



Alessandro Nocentini
La Stele etrusca di Vicchio
metodologie di rilievo per un'iscrizione da svelare



Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXVIII - Novembre 2016



Università degli Studi di Firenze
Dipartimento di Architettura DIDA
Dottorato di Ricerca in Architettura - Curriculum Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente

Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Architettura DIDA
Dottorato di Ricerca in Architettura - Curriculum Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente
Settore disciplinare ICAR 17

Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXVIII - Novembre 2016

Alessandro Nocentini

La stele etrusca di Vicchio
metodologie di rilievo per un'iscrizione da svelare



Università degli Studi di Firenze
Dottorato di Ricerca in Architettura
Coordinatore, Maria Teresa Bartoli

Curriculum in 'Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente'
XXVIII Ciclo – Settore disciplinare ICAR 17
Coordinatore di Curriculum, Barbara Aterini

<i>Dottorando</i> Alessandro Nocentini	<i>Dottorato in Architettura, Università degli Studi di Firenze</i>
<i>Tutor</i> Barbara Aterini <i>Co-Tutors</i> Grazia Tucci P. Gregory Warden	<i>Coordinatore</i> Maria Teresa Bartoli <i>Coordinatore di Curriculum</i> Barbara Aterini Firenze, 29 novembre 2016

La stele etrusca di Vicchio metodologie di rilievo per un'iscrizione da svelare

Indice

<i>Premessa</i>	6		
1. Introduzione	11	3. Sistemi di acquisizione image-based: l'approccio fotogrammetrico	45
1.1 Approccio al rilevamento: linguaggio per l'esperienza conoscitiva	11	3.1 Storia della fotogrammetria	45
1.2 Tra mimesi, significato e realtà	12	3.2 Metodologia, tipologia e campi d'impiego	52
1.3 Definizione di Patrimonio e Beni Culturali: realtà dinamica e testimonianze da conservare	13	3.3 Fotogrammetria digitale	54
1.4 Documentazione del Patrimonio Culturale	15	3.4 Principi fondamentali della tecnica fotogrammetrica	55
1.5 Dal rilievo metrico al modello digitale 3D	17	3.5 Pipeline di modellazione fotogrammetrica	59
1.6 Registrazione tridimensionale: attività chiave nella gestione dei Beni archeologici	19	3.5.1 Calibrazione della fotocamera e orientamento delle immagini	59
1.7 Gestione dei Beni archeologici: progetto interdisciplinare	21	3.5.1.1 Calibrazione geometrica della fotocamera	59
1.8 Organizzazione della ricerca: obiettivi e finalità	22	3.5.1.2 Orientamento delle immagini	63
2. Sistemi di rilevamento per l'archeologia	33	3.5.2 Misure e restituzione fotogrammetrica 3D	63
2.1 Rilevamento archeologico	34	3.5.3 Generazione del modello poligonale	64
2.2 Metodologie e strumenti di rilievo per la costruzione dei modelli 3D	36	3.5.4 Texture mapping e visualizzazione	66
		3.6 Integrazione con la Computer Vision	68
		3.7 Tecnica Structure from Motion	70

4. Sistemi di acquisizione range-based: sensori ottici attivi	89	4.7.2 Allineamento basato su features naturali (ICP)	107	5.1.7 Ruolo della donna	147
4.1 Storia dei sensori attivi	89	4.7.3 Allineamento basato su sensori complementari	109	5.2 Ritrovamento della Stele iscritta	149
4.2 Tecnologia e principi di funzionamento	90	4.8 Generazione del modello poligonale	109	6. Stele di Vicchio: management del progetto di documentazione	161
4.3 Sensori a triangolazione	91	4.8.1 Generazione della mesh da nuvole di punti strutturate	109	6.1 Scelta metodologica: dall'intervento di restauro al progetto di rilievo 3D	161
4.3.1 Scanner laser a triangolazione: piano luminoso singolo	93	4.8.2 Generazione della mesh da nuvole di punti non strutturate	110	6.2 Costruzione del modello 3D della stele prima del restauro	165
4.3.2 Scanner a proiezione di pattern: piani luminosi multipli	94	4.9 Fase di modifica e ottimizzazione	110	6.3. Costruzione del modello 3D della stele dopo il restauro	171
4.4 Sensori distanziometrici	95	4.10 Texture mapping e visualizzazione	111	6.4 Verifica e analisi dei risultati: la lettura delle iscrizioni	181
4.4.1 Scanner laser a tempo di volo (PW)	98	5. Insediamento etrusco a Poggio Colla	125	7. Conclusioni	189
4.4.2 Scanner laser a differenza di fase (CW)	98	5.1 Cronologia e orientamento del santuario	125	Bibliografia	193
4.4.3 Scanner laser FM-CW	99	5.1.1 Sviluppo fra VII e II secolo a.C.	129	Ringraziamenti	203
4.5 Caratterizzazione metrologica degli scanner 3D	100	5.1.2 Rituale e contesti votivi	133	Abstract	204
4.5.1 Risoluzione geometrica	100	5.1.3 Interpretazione dei depositi	139		
4.5.2 Accuratezza	101	5.1.4 Ritrovamenti	144		
4.5.3 Precisione e incertezza di misura	102	5.1.5 Ceramiche	145		
4.6 Acquisizione e processamento dei dati	103	5.1.6 Statuette di bronzo	145		
4.7 Allineamento delle nuvole di punti	106				
4.7.1 Allineamento basato su target di riferimento	106				

Premessa

L'efficace collaborazione fra archeologi ed architetti si è da sempre posta lo scopo di integrare le reciproche conoscenze mettendo al servizio dell'archeologia la scienza della rappresentazione, quale mezzo indispensabile per operare nel mondo della ricerca scientifica. Proprio da tale ambito scaturisce l'esperienza affrontata dalla presente tesi, dove il rilevamento è il primo veicolo grazie al quale è possibile aggiungere tessere al mosaico conoscitivo sulle culture antiche.

Il lavoro di studio svolto durante il percorso del ciclo dottorale si è così arricchito attraverso una sempre più stretta collaborazione all'interno dell'accordo internazionale di ricerca stipulato fra il Dipartimento di Architettura DIDA dell'Università di Firenze (responsabile prof.ssa Barbara Aterini), la Soprintendenza Archeologica della Toscana ed il *Mugello Valley Archaeological Project* (MVAP). L'attività, in particolare, che quest'ultimo consorzio internazionale di università americane ed europee, diretto dall'archeologo prof. Gregory Warden, conduce da oltre vent'anni presso il sito etrusco di Poggio Colla ha costituito il campo d'applicazione entro cui poter maturare l'esperienza e svolgere la ricerca raccontata nella presente tesi. In virtù del formidabile sviluppo della tecnologia applicata nel settore del Patrimonio Culturale, e soprattutto in Archeologia, si sono dunque realmente testate le potenzialità del rilievo tridimensionale, sia come nuove opportunità sfidanti le metodologie tradizionali di riferimento che come nuove forme d'indagine nel processo conoscitivo riguardo alle vicende, ai costumi, alle forme, alle tecniche che hanno caratterizzato la vita etrusca nell'insediamento di Poggio Colla. A partire da reperti quali statuine, brocche, oggetti di medio-piccole dimensioni, fino alle stesse aree di scavo, gli interventi di restituzione 3D eseguiti mediante fotogrammetria digitale e sistemi a scansione sono stati finalizzati a documentare la realtà nel miglior modo possibile soprattutto dove l'esportazione del materiale *in*

situ, via via che procedono gli scavi, scopre sempre nuove conformazioni, cancellando irrimediabilmente parte del precedente evidenziato e rimandando al rilievo quale unica testimonianza di ciò che non esiste più. D'altronde i siti archeologici, dopo la fine della campagna di scavi, spesso diventano inaccessibili, così come gli oggetti ritrovati una volta catalogati vengono ammassati negli archivi; tutto ciò rende il materiale di difficile, se non di impossibile, consultazione. Quindi il modello digitale, se prodotto tramite operazioni ben pianificate ed eseguite, costituisce un'autentica fotografia tridimensionale della realtà attraverso cui non solo restituire e misurare le varie componenti, ma anche leggere indispensabili informazioni per la loro conoscenza ed interpretazione, non ultimi il materiale, la cromia e lo stato di conservazione.

Le tecniche digitali applicate a procedure di acquisizione e modellazione 3D affidabili, rigorose e non invasive, permettono dunque, attraverso il campionamento denso e accurato dello spazio con punti di cui sono note le coordinate, di avere a disposizione in modo costante lo scavo e ciò che vi è stato ritrovato. In altri termini esse consentono la formazione di dati fruibili da parte di archeologi, di studiosi e delle istituzioni interessate, garantendone l'ulteriore diffusione anche fra i non addetti ai lavori tramite l'organizzazione in esposizioni virtuali.

L'interdisciplinarietà permessa dall'efficace e crescente collaborazione con l'MVAP è divenuta dunque la chiave di lettura dell'approccio allo studio, soprattutto nel momento in cui il ritrovamento di un importante reperto, come la Stele di Vicchio, ne ha confermato gli intenti dando la svolta decisiva al lavoro di tesi.

Straordinaria scoperta per l'etruscologia – che ha avuto un'eco mondiale e di cui si sono occupate le maggiori testate giornalistiche esistenti – tale monumento è una grande lastra in pietra arenaria del VI secolo a.C., che pesa circa 250 kg ed ha un'altezza di oltre un metro.

Era parte di un tempio che risale a 2500 anni fa e che venne demolito per costruirne al suo posto uno di maggiori dimensioni. Mentre la connessione della Stele di Vicchio al luogo in cui questa è stata ritrovata ne suggerisce già di per sé il grande valore, il contenuto del testo in lingua etrusca iscritto sulla sua superficie, probabilmente sacro, può far luce sulle prime credenze di questa civiltà antica e, contestualmente, consentire progressi significativi per lo studio della relativa epigrafia, dal momento in cui iscrizioni così lunghe sono particolarmente insolite soprattutto al di fuori di un contesto funerario.

La morfologia irregolare dei grafemi iscritti, il loro spessore sub-millimetrico e la condizione precaria della superficie della Stele in arenaria hanno costituito le maggiori problematiche per la lettura e la traduzione del contenuto testuale ivi iscritto, esigendo un completo progetto di documentazione, il cui *management* definisse e pianificasse le diverse operazioni da eseguire prima, durante e dopo la fase di restauro, coniugando le esigenze conservative del monumento con l'applicazione non invasiva di tecniche e strumentazioni ad alta definizione per la sua autentica ricostruzione 3D.

Oltre alla documentazione fotografica con luce radente, si è scelto infine di impiegare la fotogrammetria digitale ed un sensore laser a triangolazione, quali sistemi ottici non a contatto in grado di rilevare con precisione metrica e morfologica, lo status del monumento rispettivamente prima e dopo la fase di ripulitura. L'intero progetto di documentazione è stato, dunque, finalizzato alla conoscenza della Stele di Vicchio attraverso output finali tridimensionali in grado di soddisfare sia le esigenze della ricerca scientifica che i requisiti di musealizzazione virtuale per una sua più ampia diffusione.



1. Introduzione

1.1 Approccio al rilevamento: linguaggio per l'esperienza conoscitiva

L'ambito scientifico in cui si esprime questa esperienza di ricerca è l'esito di un reale interscambio disciplinare teso al superamento di quella dicotomia, percepita ed ancora percepibile, fra scienze umane e scienze esatte.

Il rilevamento, inteso nella sua semplice dimensione operativa, sintetizzata nelle azioni di misura e di rappresentazione¹ del dato là dove è stato preso, diviene strumento essenziale di quel processo cognitivo senza il quale non sarebbe possibile apprendere il valore intrinseco, ad esempio, di un oggetto architettonico – che sia un elemento, un edificio o un luogo. A tale proposito, la conversione del dato di *input*, cioè la misura presa, in informazione può avvenire se, e solo se, questo viene letto secondo regole capaci di renderlo utile. È quindi la rappresentazione, tridimensionale o ancora eseguita tramite disegni presentati su piani convenzionali mongiani, a non essere limitata alla riproduzione grafica di una realtà oggettiva, che può assumere valore di modello, ma è procedimento in grado di elaborare di fatto informazioni, associando un contesto al contenuto sensorio. Seguendo la semiologia barthesiana la rappresentazione assumerebbe il ruolo di linguaggio, permettendo di concepire e riconoscere il significato delle differenti forme di cui facciamo conoscenza², in questo caso rilevando.

Allo stesso tempo, per render ragione del medesimo fenomeno conoscitivo, lo *starting point* è rappresentato imprescindibilmente da quell'esperienza che, afferrando gli oggetti o le immagini dal mondo circostante, si pone di entrare in contatto con essi fornendone una lettura. La percezione del resto, intesa come atto cosciente in grado di misurare 'la nostra azione possibile sulle cose e quindi, inversamente, la possibile azione delle cose su di noi'³ riconduce, a sua volta, al dualismo tra materia e spirito.

La riflessione su tale rapporto, che si tradusse nel dubbio iperbolico a cui Descartes nel XVII secolo rispose con '*ego cogito, ergo sum, sive existo*'⁴, determina il riconoscimento di quei due mondi, quello del pensiero e quello della realtà, rispettivamente rappresentati dai predicati verbali '*cogito*' e '*sum*'. Così l'uomo non è soltanto coscienza e, possedendo un corpo, esprime la propria interiorità mediante segni, parole e movimenti che si manifestano nello spazio. La questione che vi sia o meno corrispondenza fra la realtà ed il fatto rappresentazionale, inteso sia come idea – tanto innata quanto avventizia o fittizia – sottesa alla realtà stessa, sia come segno rappresentante⁵, oltre che a costituire un fondamento per tutta la scienza moderna, fu argomento che può trovare le sue origini almeno a partire dal pensiero greco⁶.

Aggiornando la discussione potremmo, invece, considerare come la non separabilità dell'esperienza dal suo oggetto ci renda inclini a dire che l'oggetto sia parte dell'esperienza. 'Tale impulso è comprensibile, ma si tratta comunque di un errore. Dobbiamo ancora una volta distinguere tra l'esperienza cosciente' che si crea nella nostra testa e l'oggetto che ne è al di fuori su cui l'esperienza verte. 'Vi è infatti un senso in cui l'oggetto è parte della percezione totale, perché l'esperienza visiva sarà soddisfatta solo se vi è un oggetto, e la presenza e le proprietà di quest'ultimo causano l'esperienza visiva. Tuttavia l'esperienza stessa, l'evento cosciente che accade nella nostra testa, va distinta dall'oggetto che sta al di fuori della nostra testa sul quale l'esperienza verte. L'esperienza presenta l'oggetto, ma l'oggetto non è l'esperienza ontologicamente soggettiva, né una parte di essa'⁷. L'esperienza è nella nostra testa, mentre l'oggetto è nel mondo, al di fuori di essa.

Di conseguenza volendo determinare le fondamenta della relazione rappresentazionale, non solo dal punto di vista tecnico-scientifico, l'indagine non può certo limitarsi

Figg. X, XI – Nelle pagine precedenti, i fianchi della Stele etrusca di Vicchio fotografati con luce radente per migliorare la percezione visiva del testo iscritto.

ad un'utile 'intrusione' parallela, ma si configurerà, piuttosto, in premessa come suggestiva occasione di approfondimento articolato anche verso il profilo logico, psicologico e filosofico proprio del rappresentare, poiché si mostrano 'alcuni quesiti su categorie fondamentali, quali quella della semiosi, di segno, di rapporto di significazione, d'inferenza interpretativa, e così via'⁸. Di certo un tale *escursus* pare affermarsi come *conditio sine qua non* nell'esperienza di ricerca, poiché sarebbe impossibile trascurare i contorni filosofici, e non solo, che hanno condizionato l'uso, soprattutto in senso semantico⁹, dell'attività di rappresentare nei secoli, il cui ordine è sempre stato declinato, in base alle diverse finestre di osservazione, in modi d'intendere molteplici.

Analogamente, adoperando tali contorni per lo studio della produzione rappresentazionale nel campo del rilievo, non potremmo evitare di porci il dubbio che nasce dall'individuazione del primato, in termini evolutivi, fra le capacità reciproche rappresentazionali e linguistico-verbali. Il rimando continuo fra queste due espressioni non è certo il fine di questa indagine, ne rappresenta però uno stimolo per lo sviluppo del ragionamento sui rapporti che intercorrono fra il linguaggio ed il pensiero. Quando viene tracciato un segno con la matita, il riconoscimento di quell'operazione sottesa consiste nell'eguire materialmente il segno di una visione mentale¹⁰; così dalla semplice notazione del segno grafico di un punto è possibile ottenere non solo l'indicazione di una probabile posizione spaziale, ma anche quella di alcune condizioni d'essere che vengono espresse attraverso l'uso del linguaggio.

I passaggi successivi resi necessari saranno, a questo punto, proprio quelli di definire – *in primis* – la corrispondenza fra segno e realtà, ed in quale modo la facoltà rappresentazionale possa configurarsi come strumento d'indagine oggettivo fino ad essere costruzione di una nuova e coerente esperienza spaziale.

1.2 Tra mimesi, significato e realtà

Ogni qualvolta viene impiegato il termine 'rappresentazione' il significato attribuitogli, nei più svariati ambiti, riconduce inevitabilmente ad aspetti tipici dell'esperien-

za conoscitiva¹¹. La facoltà a cui fa riferimento la stessa origine latina della parola¹² ne spiega il contenuto relazionale, indicando l'immediato atto di render presente qualcosa che viene corroborato dall'apertura iterativa ed intensiva del prefisso verbale. In questo caso la traduzione letterale, ponendosi come veicolo di legittimazione etimologica per tutte quelle scienze che si prefiggono di ri-presentare la realtà, più che mai si ricollega alle operazioni di ri-lievo denunciandone lo scopo¹³.

Infatti quel procedimento mimetico sotteso dal concetto proprio del rappresentare, esplicitandosi talora nel rapporto esistente fra soggetto ed oggetto, fra sistema rappresentativo e sfera rappresentata, richiama subito la sua determinazione minimale, per cui *aliquid stat pro aliquo*, ovvero qualche cosa si trova al posto di un'altra¹⁴. Tale sinteticità non può essere, tuttavia, limitata ad un'accezione esclusivamente descrittiva o fenomenologica della rappresentazione, poiché il suo significato si configura come il tessuto stesso del pensiero¹⁵. Del resto il concetto della *intentio*, tipico della scolastica medioevale¹⁶ e reintrodotta per opera di Brentano¹⁷ nella seconda metà del XIX secolo, esprimendo quella relazione tensiva del soggetto verso l'oggetto, per la quale il pensiero rimanda sempre a qualcosa di pensato, non è altro che un *modus* d'interpretare la rappresentazione¹⁸.

L'essenzialità di questo ragionamento, sfruttata in contesti comuni non solo intuitivi¹⁹, conduce notoriamente ad una condizione aporetica – fra l'essere, la verità e la causalità della rappresentazione – innanzi alla quale si comprende come quest'ultima sia 'difficile da definirsi'²⁰.

Un'opportuna chiave di lettura a tale tipo di problema consisterà nel riconoscere, innanzitutto, quel dualismo partecipativo di ogni sistema di rappresentazione fra percezione e concetto di proposizione, fra sensibile ed intelligibile. Infatti il fondamento comune delle rappresentazioni, indipendentemente dalla loro natura, si colloca proprio in quel fine designativo a cui viene attribuito un significato²¹, ossia un contenuto attraverso il quale poter convalidare l'identificazione dell'oggetto in ciò che è rappresentato²². Tuttavia l'aspetto semantico non è l'unico a dover essere considerato. L'origine pragmatica nell'elaborazione del linguaggio rappresentazionale, ovvero l'uso che ne fa l'autore, diviene parte indispensabile per lo sviluppo semantico da cui non può certo prescindere

una relazione sintattica in grado di render conto dei significati prodotti.

In tale quadro l'introduzione dello statuto dello stesso termine 'modello' quale costruzione, piuttosto che come realtà da copiare o riprodurre, pare risolvere le questioni aporetiche.

Difatti la funzione del modello consiste proprio nel riunire aspetti, di per sé apparentemente contraddittori, poiché questo – come dice Vittorio Ugo²³ – 'da un lato denota e richiede il massimo di pertinenza e specificità in quanto deve render conto precisamente' di un oggetto specifico ed individuabile, mentre 'dall'altro esso è tale solo se contiene un elevato grado di generalità'. La nozione di modello assume allora un ruolo del tutto centrale nei confronti dell'intera tematica della *mimesis* (o *μίμησις*) sia che la si consideri come motivazione e finalità, sia come processo che dirige e regola la rappresentazione, costituendone anche lo stesso contenuto critico ed estetico²⁴.

Nel momento in cui il modello istituisce una forma di analogia sulla quale si fonda, questa, per essere soddisfacente e scientificamente valida, deve tenere conto dell'omologia: oltre ad apparenti similitudini occorre che vi siano delle 'corrispondenze funzionali correttamente analoghe' e non solo 'nel senso matematico del termine'²⁵ ma anche proiettivo²⁶. Ciò che dobbiamo aspettarci dal modello è che questo sia capace di fornire una sintassi che conservi le strutture fondamentali, ovvero la 'forma' che individua in modo univoco e critico l'oggetto ed il suo 'schema' (o *σχῆμα*), le sue proprietà intrinseche. Affinché la *mimesis* della rappresentazione sia efficace ed effettiva, occorre quindi che essa possa render conto nel modo più possibile compiuto di tutte le proprietà che strutturano le qualità formali delle cose. In tal senso, non è la semplice immagine, ma è la forma a costituire il modello della eventuale 'imitazione'; ne consegue perciò che lo stesso oggetto mimetico di riproduzione sarà un modello e, simmetricamente, ancora un modello ne costituirà l'esito.

Da ciò se ne deduce che, nell'ambito della presente esperienza di ricerca, la specificità del modello sarà quindi legata alla pertinenza della scelta degli elementi che definiscono l'oggetto nella sua precisa individualità e le cui relazioni sintattiche debbono essere conservate in ogni trasformazione. In tal caso, la suddetta generalità deri-

verà invece 'dal codice sintattico che legittima l'elaborazione e che per l'essenziale è strutturato sulla geometria' e sugli stessi strumenti del disegno. Qualunque sia la sua natura ed il suo scopo, ogni disegno sarà dunque 'tematizzato': dovrà cioè formalizzare un problema intuendo un'omologia con il proprio modello fisico e/o teorico e conseguendo allo stesso tempo la *mimesis* tramite la produzione del modello rappresentazionale.

I nuovi termini che impostano la questione sono, dunque, profondamente mutati rispetto all'accezione di *mimesis* oggi superata. Adesso l'oggetto principale di riferimento non è più la figura, l'immagine o l'aspetto fenomenico visivamente percepibile; ora si tratta piuttosto di una 'idea', di un contenuto principalmente intellettuale, di una modalità critica, di qualche cosa che certamente si approssima alla proposizione teorica, ovvero di qualcosa che si avvicini maggiormente al 'testo'.

Sebbene lo spostamento dell'oggetto e dell'esito della *mimesis* dall'immagine alla forma – e quindi allo schema – non appaia neutrale o privo di significati e di implicazioni, questo comporta inevitabilmente almeno l'integrazione – se non la totale abolizione – dell'abituale sintassi percettiva e grafica che dirige quel tipo di relazione fra realtà e sua rappresentazione che si fonda sull'immagine. Si manifesta, pertanto, l'esigenza di reperire altri codici ed una rinnovata sintassi che rimposti in modo scientifico e verificabile quella relazione.

La *mimesis*, dunque, come la forma di quel processo e di quella modalità che è la rappresentazione pertinente della realtà, la costruzione del suo modello omologo nelle sue relazioni tra forma e teoria, fra materialità fisica e concetto geometrico, fra la sua *hæcceitas*²⁷ e la sua irrinunciabile appartenenza alla storia.

1.3 Definizione di Patrimonio e Beni Culturali: realtà dinamica e testimonianze da conservare

Il significato che la parola 'patrimonio'²⁸ acquisisce nel senso comune è un complesso di cose materiali e non, dette più precisamente beni, che appartengono ad un individuo singolo o ad un'intera comunità, ed il valore che ad essi viene attribuito è del tutto evidente. Nel caso in cui tale importanza sia dovuta a particolari caratteristiche

storico-culturali ed estetiche del bene, fino a diventare di interesse pubblico, oltre che a costituire la ricchezza di un luogo e della sua popolazione, è possibile definire il patrimonio 'culturale'. Questo recente approdo terminologico²⁹ riesce bene a coniugare il valore economico, a cui allude la medesima definizione, con il pregio riconosciuto al capitale collettivo in oggetto: i cosiddetti Beni Culturali.

Essi costituiscono le radici identitarie della civiltà di una Comunità, in quanto testimonianze relative alla presenza umana nel tempo, prefigurandosi dunque come l'eredità che le generazioni precedenti hanno trasmesso dal passato attraverso tradizioni ed opere tangibili. Ecco perché le meraviglie del mondo, gli edifici del passato o le rovine di un sito archeologico, ad esempio, sono considerate ricchezze per l'umanità.

I Beni Culturali forniscono quel bacino fondamentale entro cui si forma e si costruisce la vita sociale individuale e collettiva ma se, in un certo senso, aiutano l'uomo a collocarsi nel tempo e nello spazio – poiché il suo passato diviene la motivazione, la causa di ciò che è, influenzando i suoi comportamenti, il suo modo di pensare, di vedere, etc. – dall'altro rimangono un prodotto dell'azione umana. Così il patrimonio culturale si conferma come l'esito di una costruzione facente parte di quell'ambiente totale³⁰, geografico e sociale, in cui è anche compreso l'elemento umano.

Questo ambiente, quindi, non può essere considerato la sorgente o il fattore generatore di una civiltà poiché esso stesso è il risultato del comportamento interagente di tutti gli elementi che lo compongono, umani e non. 'L'ambiente di un organismo non è qualcosa di compiuto, ma si forma continuamente a misura che l'organismo vive ed agisce [...] si potrebbe dire che l'ambiente è estratto dal mondo della esistenza dell'organismo'³¹. Di conseguenza, il patrimonio culturale si mostra anch'esso una realtà dinamica, in quanto insieme aperto ed in continuo ampliamento in cui si contano sempre un maggior numero di beni (dati, materiali, oggetti, strutture, etc.) a partire dalle opere d'arte più recenti fino agli ultimi ritrovamenti o acquisizioni fatte in campo architettonico ed archeologico. In quest'ultimo, infatti, è sempre 'potenzialmente disponibile una messe di informazioni, sterminata e in continuo accrescimento' – come dice Daniele Manacorda

– da ricercare 'nell'infinita estensione degli insediamenti umani'³² o nel terreno sotto di noi, ove possono celarsi tutti quei documenti che, talvolta, hanno la dimensione di monumenti piuttosto che essere semplici reperti.

Dal momento in cui la società internazionale individua e riconosce un certo pregio ad un complesso di cose, essa seleziona quali siano i beni che compongono il patrimonio appartenente alla collettività. Sebbene ciò sia un principio ormai condiviso e rispettato a livello mondiale, ad eccezione di alcuni casi estremi, è bene non sottovalutarne o dimenticarne l'importanza: si tratta infatti di un'opera di catalogazione e ridefinizione che mira ad estendere l'appartenenza dei beni culturali, il trasferimento della loro proprietà, da una comunità singola all'Umanità.

La definizione di Patrimonio Culturale³³ contenuta nella Convenzione internazionale UNESCO del 1972, oltre che a sancirne l'eccezionale valore universale, introduce al tema della salvaguardia dei beni culturali affinché questi siano conservati come parte del patrimonio mondiale di tutta l'umanità. Infatti, fra le maggiori motivazioni di tale indirizzo, rilevante fu proprio l'emergenza organizzativa di un sistema permanente di 'protezione collettiva del patrimonio culturale' che fosse supportato da metodi scientifici e moderni. L'invito diretto, in particolare, alla comunità scientifica perché venisse incentivata la ricerca nel campo del management relativo al patrimonio culturale indicava già le cinque linee di intervento a cui concorrere: l'identificazione, la tutela, la conservazione, la valorizzazione ed il restauro. Sebbene siano già trascorsi quasi 50 anni dalla stesura della succitata Convenzione internazionale, l'esigenza di documentare e descrivere nel modo più appropriato ed efficace, ai fini della loro conservazione attiva, le varie categorie di beni che compongono il patrimonio culturale sottoposto a salvaguardia è più che mai attuale.

Le difficoltà derivanti, per assolvere a tale compito, dalla estensione e dalla articolazione di quelle che possono, a ragione, considerarsi 'testimonianze aventi valore di civiltà' hanno quindi posto in primo piano l'adeguatezza dei sistemi di catalogazione dei beni 'soprattutto in relazione alla documentazione delle condizioni conservative, oltre che per valutarne il grado di vulnerabilità a fronte dei diversi fattori di rischio'³⁴.

La questione della conservazione dei monumenti, degli

edifici e dei siti non può venir certo ridotta ad un esercizio puramente tecnico: non basta diagnosticare il problema ed indentificarne un rimedio. I valori sono centro di tutta la gestione del patrimonio ed è proprio quel valore evidente attribuito ai beni a costituire ciò che li rende parte della 'ricchezza' collettiva, cosicché prendersi cura di essi comporta almeno il rispettare ciò che li rende preziosi³⁵.

Del resto, seguendo l'elenco delle linee di intervento sancite sopra, l'identificazione occupa il primo posto, poiché non sarà mai possibile tutelare ciò che non si conosce; quindi l'istituzione di qualsiasi protezione giuridica nell'esercizio per i Beni Culturali sarà vincolata al fatto che questi siano conosciuti. L'esigenza di tutela del patrimonio deve essere, dunque, accompagnata da iniziative di censimento e catalogazione.

1.4 Documentazione nel campo del Patrimonio Culturale

'L'atto del rilievo critico e della rappresentazione grafica dei fenomeni analizzati costituisce – come dice Bini – un passaggio obbligato nelle operazioni che tendono ad evidenziare l'ordine, da sempre insito nelle opere dell'uomo, per poterlo studiare, documentare, trasmettere al fine di capirne il significato e poterlo 'riprodurre'³⁶.

Così riuscire a rappresentare fedelmente le caratteristiche formali, cromatiche e la tessitura dei manufatti che compongono il patrimonio culturale è l'esito di un processo conoscitivo in cui l'elemento strutturale primario viene definito proprio dal rilievo.

L'esigenza di fissare ad un determinato istante lo stato attuale dei beni, implica eseguire quelle operazioni in grado di registrare fedelmente i loro caratteri, 'le loro componenti morfologiche, tecnologiche, costruttive ed intenzionali, astraendole dal processo temporale del continuo divenire'³⁷. In tal modo se lo studio critico che si sviluppa mediante il rilievo, attento e ragionato, riesce a leggere l'evoluzione dei manufatti risalendo fino al suo stato originario, esso non si limita ad essere sistema conoscitivo, ma diviene progetto per la conservazione, la comunicazione e la gestione.

Di conseguenza la definizione del tipo di intervento da

eseguire sarà condizionata, oltre che dalle finalità preposte, dal carattere dell'oggetto da rilevare; sarà innanzitutto quest'ultimo a presiedere 'alla scelta del metodo e della tecnica, perché – come considera Cundari – se io rilevo condizionatamente allo scopo, non documento che per quello scopo e basta. Se viceversa, io rilevo per documentare, ho la necessità di conseguire il risultato che l'acquisizione dei dati che io vado a compiere sia di per se stessa il più possibile esaustiva' ed occorre quindi 'chiarirsi bene per cosa si documenta, il che rappresenta il problema che è a monte di tutto'³⁸.

Tale necessità non potrebbe essere soddisfatta se non per mezzo di un rilievo completo, oggettivo e multi informatore, che venga inteso come 'momento di un percorso più complesso che riguarda l'intero *lifecycle* del patrimonio, ma anche come scenario culturale nel quale si definiscono e attuano nuove forme di conoscenza complessa del reale visualizzato'³⁹. Esperienza che, quindi, si spinge oltre i tradizionali orizzonti della pratica tecnica connessa al momento della misura, aprendo quesiti inediti sull'interpretazione del dato metrico per la valutazione dei segni tramandati che indicano la storia del bene in oggetto, a partire dalle sue origini nella mente del progettista, alla sua creazione e modifica.

Dunque testimonianze, tracce di trasformazioni formali, materiali e funzionali che non potrebbero altrimenti emergere, se non lette 'da chi possiede una conoscenza profonda dell'organismo stesso, nonché del clima culturale nel quale questo è nato e sviluppato'⁴⁰.

Dal momento in cui il Patrimonio Culturale può esser visto come un oggetto tangibile (fisico) o immateriale che si eredita dalle generazioni del passato, quando si passa ad esaminare il problema relativo alla conservazione ed al recupero dei segni della presenza umana, rappresentati dalle opere prodotte, le considerazioni da fare non sono mai semplici e scontate.

Infatti registrare le caratteristiche fisiche degli oggetti e delle strutture storiche, dei siti archeologici, e dei loro paesaggi costituisce una pietra angolare della loro conservazione, qualunque cosa significhi attivamente mantenerli o salvaguardarli per il futuro.

Tale finalità richiede, però, una comprensione critica del significato, delle condizioni e della complessità del patrimonio di cui facciamo conoscenza. Così la documenta-

zione è un elemento essenziale nella costruzione di questa comprensione⁴¹.

Sebbene il contatto diretto rimanga insostituibile, l'avvento della nuova tecnologia applicata al settore ha rivoluzionato la pratica di registrazione dei prodotti delle attività umane – oggetti, strutture e luoghi – producendo nuove opportunità che sfidano le metodologie tradizionali di riferimento. ‘In questi ultimi decenni la ricerca scientifica nel settore della rilevazione e della visualizzazione dei dati del rilievo ha fatto passi da gigante costringendoci a rivedere modalità e procedure che, per alcuni

aspetti, possiamo considerare immutate da secoli; mi riferisco, ad esempio, alle modalità della presa della misura con longimetri o alla restituzione in scala di immagini relative a proiezioni su piani, talvolta lontane dalla visione “reale” dell’oggetto’⁴².

La rapida crescita del supporto tecnologico a disposizione ha infatti spinto progressivamente verso un’automazione dei sistemi di rilevamento, ponendo nuovi quesiti sulle modalità di gestione dei dati ed esplorando inedite forme di rappresentazione dei manufatti e dell’ambiente, sia naturale che costruito.

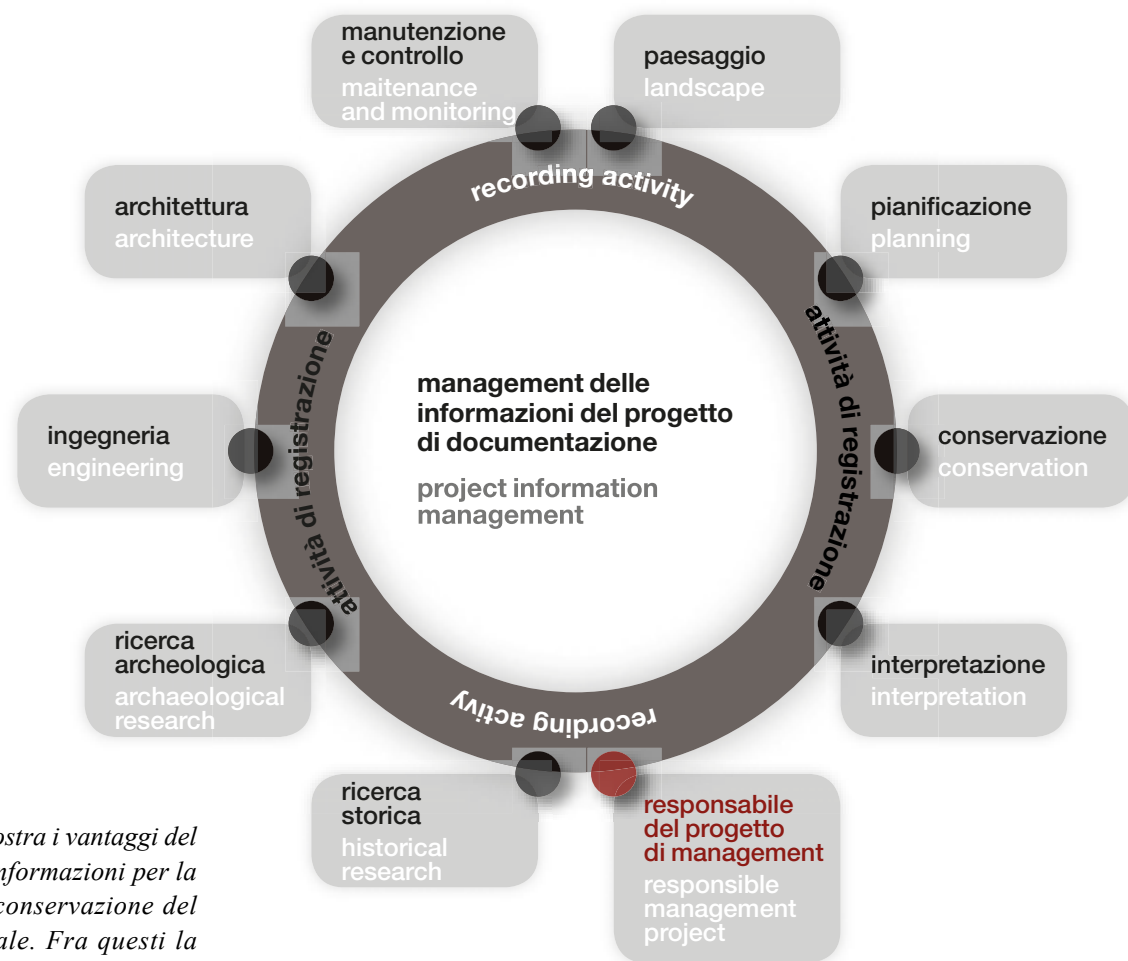


Fig. 1 – Il grafico mostra i vantaggi del management delle informazioni per la documentazione e conservazione del Patrimonio Culturale. Fra questi la massima condivisione dei record acquisiti, la maggiore accuratezza e coerenza durante la fase di registrazione costituiscono le condizioni fondamentali per ottimizzare il lavoro di ricerca e di analisi.

1.5 Dal rilievo metrico al modello digitale 3D

L’introduzione di nuovi strumenti per il rilievo, come quelli che sfruttano le tecniche ottiche di misura 3D, ha scardinato di fatto il consueto processo conoscitivo cambiando non solo il metodo e le pratiche per l’acquisizione dei dati, ma anche i rapporti fra il rilevatore, il manufatto e la sua rappresentazione. Infatti se queste tecniche da una parte possiedono uno straordinario potenziale per le finalità documentative, di analisi, di restituzione e di diffusione del patrimonio, dall’altro ne influenzano irrimediabilmente i risultati, indirizzando il rilevatore verso contesti grafico-analitici e modalità d’indagine, tipiche della tecnica stessa.

Così, sebbene oggi l’informatica abbia interessato tutti gli aspetti del rilievo, al punto che catturare digitalmente le risorse del patrimonio culturale sia ormai una pratica comune, il ‘problema della misura’ resta comunque ‘centrale – come dice Carlo Monti – nella questione della conoscenza scientifica che morde nel reale’; ciò implica ‘una metodologia di rilievo che permetta il passaggio dal monumento ad un modello realistico, dove le geometrie siano reali nell’ambito dell’incertezza della misura e dove le ‘forme’ non siano interpretate sulla base dell’esperienza storica e stilistica, ma sulla base della posizione, in un opportuno sistema di riferimento, di innumerevoli punti appartenenti alle componenti architettoniche’⁴³.

Questi presupposti fondamentali, se nel rilievo dei monumenti dichiarano tradizionalmente ‘il sussistere della complessità insita fra l’analisi sensoria scrupolosa e la lettura della forma da restituire’⁴⁴, non possono essere, tuttavia, nemmeno trascurati nella registrazione effettuata mediante le nuove tecniche. Infatti nonostante il vantaggio di ‘oggettività’ che esse introducono nel rilevamento, generando modelli numerici tridimensionali navigabili e consultabili – le nuvole di punti⁴⁵ – che codificano per punti la continuità delle forme reali, il problema della misura implica più che mai esaustive conoscenze tecniche e metodologiche nelle varie fasi di passaggio dal monumento al modello. Peraltro la tendenza verso una ‘modellazione virtuale della realtà tramite cui operare ogni tipo di aggregazione e manipolazione dei dati’⁴⁶ ha talvolta indirizzato la ricerca nel settore, sollecitando

lo sviluppo di procedure e di tecniche di rilevamento capaci di coniugare il necessario quoziente di attendibilità e completezza dei dati acquisiti con i requisiti di massima speditezza nelle operazioni di campagna. Processo che, a partire dalla stereofotogrammetria⁴⁷, è stato orientato in direzione di una ‘separazione netta fra la fase di acquisizione e quella di restituzione’ ovvero verso – come considera Aldo De Sanctis – ‘la possibilità di osservare in “laboratorio”, con alto senso del dettaglio, le forme e la composizione di un’opera (o di una sua parte) e derivarne elaborati e, soprattutto l’opportunità di realizzare un modello virtuale [...] per condurre l’analisi ed ottenere informazioni sia ai fini della conoscenza che della valorizzazione’⁴⁸.

Così oggi, con le tecniche ottiche di misura 3D, il trasferimento del momento della misura dalla fase diretta di presa, nel caso dello scanner laser costituita dalle ‘scansioni’, ad operazioni da eseguire in una fase successiva, cambia l’approccio attraverso cui registrare il patrimonio, senza alterarne comunque le finalità. Seppur riducendo i tempi di lavoro sul campo, la validazione scientifica per l’intero progetto di registrazione 3D richiederà un’analisi sensoria altrettanto scrupolosa, da svolgere però sulla nuvola di punti, che sia in grado di stabilire in modo preciso le coordinate spaziali, le dimensioni, gli aspetti formali e le altre caratteristiche ottenibili mediante la determinazione delle distanze fra i punti rilevate digitalmente. Del resto il fatto che un’appropriata progettazione durante l’acquisizione delle stesse scansioni, assieme alla risoluzione delle problematiche connesse al loro successivo allineamento, rappresentino anch’esse requisiti indispensabili, accresce in realtà la complessità dell’intero progetto di registrazione. ‘Le tecnologie di rilevamento a distanza, infatti, ci permettono di acquisire una grande quantità di misure, ma la selezione dei punti non avviene al momento della presa, se non nello stabilire un passo di scansione, una griglia più o meno fitta in grado di cogliere una sorta di modello intermedio fra realtà e rappresentazione, costituito – appunto – da una nuvola di punti nella quale l’architettura viene scomposta’⁴⁹.

La corrispondenza isomorfa stabilita da questa forma discreta con la realtà rilevata, garantendo la possibilità di scindere la campagna di acquisizione dei dati dalle suc-

cessive fasi di misura, di discretizzazione ed interpretazione, fa sì che la nuvola di punti si configuri a tutti gli effetti come una 'copia del reale', ovvero un documento digitale che – nonostante la traduzione virtuale e la distanza dalla realtà – sia in grado di sollecitare un'azione analitica coerente diventando un veicolo attraverso cui poter leggere *ad libitum* tutte le informazioni.

L'avvento della modellazione 3D e degli strumenti (*hardware e software*) per ottenere "nuvole di punti" modifica radicalmente [...] il modo di operare e di pensare nel rilievo⁵⁰. Sebbene il controllo e la verifica dell'autonomia del modello tridimensionale rispetto alla realtà esiga sempre riferimenti ad appunti grafici e fotografici presi sul campo, il rapporto diretto del rilevatore rispetto ai monumenti studiati pare mutuare definitivamente in un dialogo indiretto. Non è più il disegno sul foglio di carta, piuttosto che sul piano, a costituire la base su cui costruire il modello spaziale ma è, invece, dal modello digitale 3D stesso che vengono dedotti gli elaborati bidimensionali utili, oltre a quelli estrapolati, simulativi la terza dimensione. Un tale capovolgimento, tuttavia, non riduce l'impiego di quel 'mezzo per ricercare la verità' a cui i rilevatori vengono tradizionalmente abituati per 'rappresentare su un foglio da disegno – cioè in due dimensioni – [...] tutti i corpi della natura che ne hanno invece tre, lunghezza larghezza e profondità – riconoscendone – sulla base di una descrizione esatta, le forme dei corpi – e deducendone – tutte la verità che emergono, e dalla loro forma e dalle rispettive posizioni⁵¹; ne modifica, caso mai, le modalità e l'ambiente di applicazione.

Il modello 3D, sia in forma discreta di nuvola di punti che in quella geometrica, offre potenzialità interattive tali da espandere le capacità visuali e analitico-operative attraverso uno spazio tridimensionale disciplinato comunque da canonici concetti descrittivi⁵². Permane, infatti, quella 'capacità di pensare nello spazio tridimensionale', fondata sulle operazioni fondamentali della geometria proiettiva, che conduce a cogliere la corrispondenza biunivoca fra l'oggetto reale e la sua rappresentazione, cioè dato l'uno è possibile trovare l'altra e viceversa⁵³.

L'interazione, così ottenuta attraverso la visualizzazione, l'esplorazione e la manipolazione dei modelli 3D in ambiente virtuale, raggiungendo talora un'evoluta qualità e quantità informativa ed eliminando le tipiche omissioni

del sistema bidimensionale dovute a proiezioni e sezioni⁵⁴, costituisce un dialogo attivo con la realtà simulata senza far dimenticare però l'efficacia dei concetti su cui si basa il contesto grafico tradizionale.

D'altronde il ricorso alla modellizzazione, quale risposta nelle applicazioni scientifiche alla richiesta di riproduzione in tre dimensioni della realtà, non è certo una novità: 'per rendersene conto basta ricordare che molto spesso si studiano i sistemi con l'aiuto di *maquettes*, oggetti perfettamente reali, "modellini" di taglia ridotta, da cui si riesce spesso, correggendo opportunamente l'effetto della riduzione di scala, a trarre delle risposte quantitative⁵⁵. Benché la 'modellizzazione digitale' non si discosti concettualmente dalle finalità figurative espresse mediante i plastici – che permettono di conoscere i manufatti riprodotti e di trarne 'delle risposte quantitative' – ha, però, il vantaggio di descrivere la realtà non solo come insieme di volumi e di materia, ma anche come spazio percepito. L'interazione offerta dall'ambiente virtuale stimola il rapporto percettivo dell'utente fino ad accrescerne anche il suo apprendimento spaziale.

Le attività di visualizzazione, esplorazione e manipolazione del modello sono così opportunità attraverso le quali l'utente può formulare ipotesi ed agire sulla forma, riuscendo contemporaneamente sia a verificarne gli esiti che ad ottenerne i riscontri necessari ai fini interpretativi. Non per ultimo, la possibilità di indagare accuratamente le geometrie del modello digitale, definendone le forme, le regole compositive, le caratteristiche ed i rapporti che intercorrono con la matrice formale ideale, permette di porre in essere valutazioni sugli aspetti non solo quantitativi ma anche qualitativi (come ad esempio le alterazioni dovute ai molteplici fenomeni di degrado).

Pertanto, se da un lato il modello digitale 3D è un sistema complesso di dati da cui è possibile trarre informazioni di varia natura, dall'altro costituisce un modello aperto che facilita una diffusione rapida ed agevole delle informazioni in esso contenute. Circostanze che – come già diceva Abraham Moles nel 1972 – confermano quanto la rappresentazione che adopera modelli 3D aiuti a migliorare non solo la visualizzazione, o la conservazione delle informazioni, ma soprattutto la loro definizione, semplificando l'organizzazione ed integrando la restituzione con un sistema di dati conoscitivi⁵⁶.

1.6 Registrazione tridimensionale: attività chiave nella gestione dei Beni archeologici

‘Nel passaggio dai metodi tradizionali per rilevare a quelli digitali – come considera Aldo De Sanctis - la novità più importante [...] è costituita dal modello digitale 3D, che viene a definirsi come insieme discreto di punti – nuvola di punti – acquisiti sull'architettura reale e determinati in *x, y, z*, con un'accuratezza metrica definita – e da questo – possono poi dedursi i modelli poligonali – *mesh* a facce piane, i cui vertici coincidono con i punti acquisiti (processi di *meshing*) – su cui applicare le *texture* per simulare compiutamente la realtà⁵⁷.

Quindi il modello digitale 3D, nascendo quale modello numerico discreto da cui è possibile elaborare modelli continui, poligonali e per superfici, oltre a dare una risposta all'utente-rilevatore in termini di acquisizione si prefigura, anzi 'deve considerarsi', come 'un dato oggettivo'⁵⁸ – soddisfacendo talora la sua 'sete di misura' nei confronti del monumento – attraverso cui non è solo lecito tradurre la realtà, ma anche condurre prove di lettura e verifica altrimenti impossibili.

Se tradurre in una codificazione di punti 3D⁵⁹ gli 'organismi' del patrimonio che ci circonda, significa ricostruire la loro 'pelle' attraverso un modello digitale da cui risulta possibile acquisire direttamente le loro caratteristiche determinanti – il volume, la forma, il colore, lo stato superficiale, l'orientamento, etc. – tale procedura, che si svolga in modo automatico, semi-automatico o richieda ancora interventi manuali, rivoluziona l'intera attività di rilevamento verso la ricerca di output.

Da questo punto di vista, nel momento in cui il rilievo non è solo 'un'operazione di misura ma, soprattutto, un'operazione di "lettura" orientata verso la conoscenza critica dell'oggetto⁶⁰, le finalità interpretative concesse dalla nuova forma di accessibilità conoscitiva fanno sì che, mediante la modellazione digitale 3D, sia possibile elaborare prodotti funzionali per l'interpretazione e, al tempo stesso, anche nuove occasioni per la comunicazione delle esperienze acquisite sul bene rilevato. Fra l'altro, le opportunità ottenibili attraverso il trattamento dei dati acquisiti – come nel caso di visite virtuali, di mappatura del colore o *texture mapping*⁶¹, di modellazione semantica⁶², etc. – stimolano e corroborano, grazie all'impiego di

software dedicati, la percezione e la creatività produttiva dell'utente-rilevatore verso un dialogo sempre più attivo.

In effetti, a partire dalla nuvola di punti, l'estesa permeabilità informativa del modello digitale 3D fa sì che questi rappresenti, d'accordo, il risultato di un nuovo modo per acquisire misure e forme, ma in particolare costituisca novità per osservare, per conoscere, per indagare e comprendere, adattandosi bene alla registrazione delle testimonianze del passato. Circostanze che rispondono ai requisiti di un *record* sempre più obiettivo, coerente (metricamente) ed evoluto, facendo del modello digitale 3D 'una sorta di archivio inesauribile'⁶³ attraverso cui guardare e fissare il bene rilevato in un dato punto nel tempo, uno strumento di straordinaria efficacia per la documentazione e la diffusione del Patrimonio Culturale, e soprattutto dei Beni archeologici.

Quando la registrazione si configura come prerequisito per la conservazione consapevole di un monumento, che si tratti di un sito di scavo o di un reperto ivi recuperato, la disponibilità di metodi e tecniche in grado di descrivere in dettaglio la configurazione fisica, dimensionale, geometrica e spaziale del bene 'consentendone un'archiviazione "certificata" delle informazioni originarie⁶⁴, assume fondamentale importanza.

Nel campo archeologico è innegabile, infatti, l'emergenza documentativa di fronte alla natura, spesso irripetibile e 'distruttiva', del patrimonio di un luogo 'dove l'asportazione del materiale in situ, via via che procedono gli scavi, scopre nuove conformazioni, cancellando irrimediabilmente parte del precedente evidenziato, rimandando al rilievo quale unica testimonianza di ciò che non esiste più⁶⁵. Di conseguenza ciò diviene motivo di un accrescimento di responsabilità sia nei confronti del bene da conservare, che per la scelta di un approccio, di una metodologia e di una tecnica corretti, ovverosia di un sistema di rilevamento il più completo possibile.

‘La registrazione di oggi è la documentazione di domani⁶⁶ e benché non rappresenti solamente un obbligo etico per i posteri, ma implichi anche benefici immediati in termini di progettazione, di comunicazione interdisciplinare e di valutazione dei risultati, essa è una responsabilità primaria per tutti coloro che sono coinvolti nei processi di conservazione.

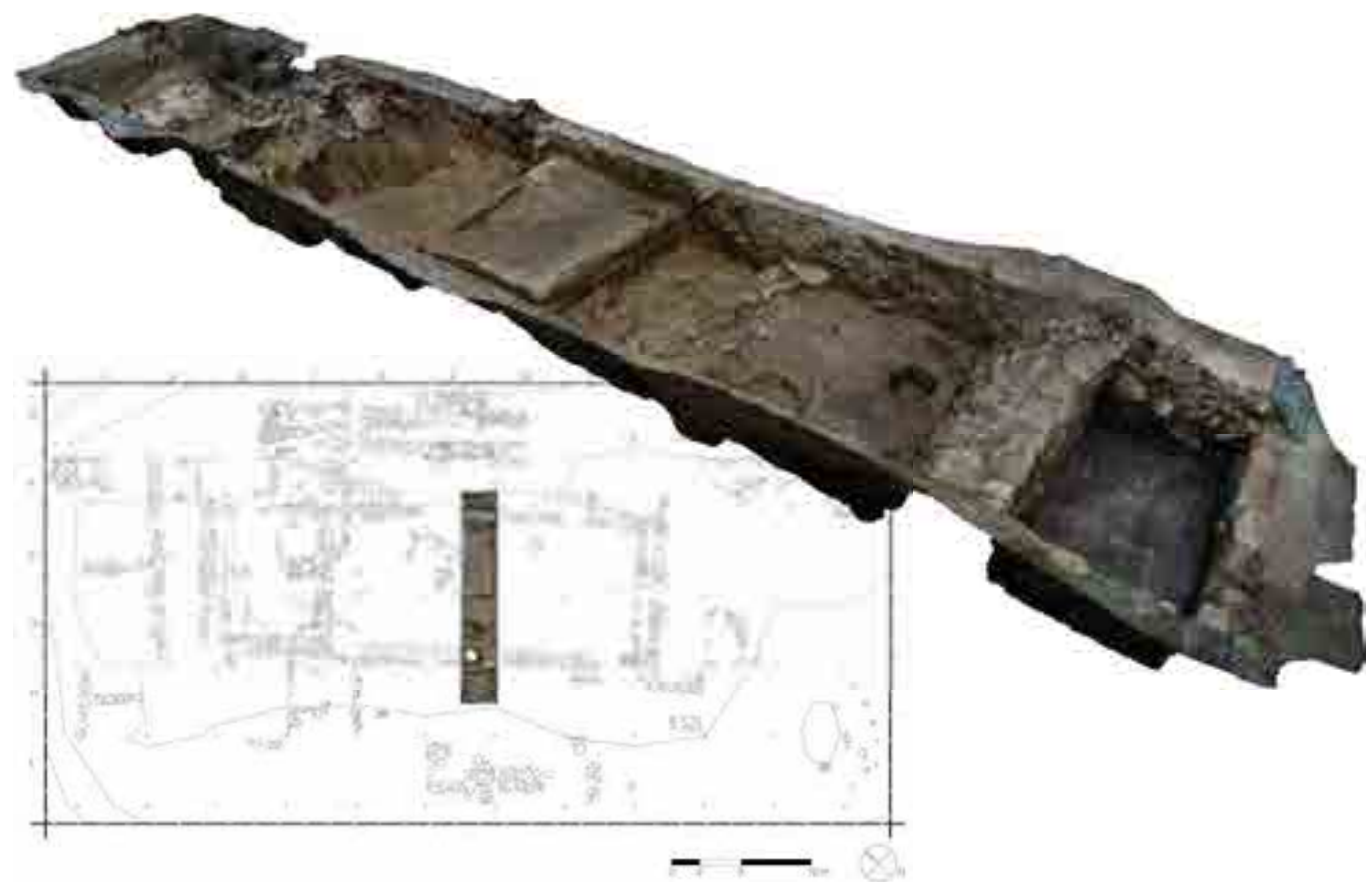


Fig. 2 – (in alto) Il modello tridimensionale ottenuto tramite fotogrammetria digitale di un'area di scavo (PC45) sull'altopiano di Poggio Colla. Tale modello, documentando l'area durante la campagna di scavo, ne permette lo studio e l'analisi anche in momenti successivi alla campagna stessa.

Fig. 3 – (al centro) Planimetria del sito etrusco di Poggio Colla a Vicchio, con l'inserimento dell'ortofoto dello scavo PC45 ricavata dal modello 3D.

Fig. 4 – (in basso) Vista dell'acropoli di Poggio Colla. Una volta conclusa la campagna di scavo il terreno viene posto, anche per questioni di sicurezza, a coprire nuovamente la buca scavata e già rilevata.

Tali principi causano ancora un maggiore interesse in campo archeologico, dove la rappresentazione grafica è stata sempre il mezzo più appropriato per spiegare e comunicare la complessità della documentazione archeologica, descrivendone interrelazioni e contesti.

Nonostante il ricco panorama dei problemi immateriali, come i fattori sociali ed economici, la maggior parte degli aspetti che debbono essere registrati sono direttamente correlati alla configurazione fisica del patrimonio rinvenuto; il mezzo visivo assume così un tale ruolo predominante nella trasmissione delle informazioni archeologiche che l'archeologia sembra essere – come dice Juan A. Barceló – una disciplina tipicamente “visiva”⁶⁷. A tale riguardo è così ineludibile la pertinenza di una registrazione che permetta di ri-presentare i reperti, i monumenti, gli scavi, ricostruendoli in un ambiente virtuale dove, fra l'altro, l'impiego di quelle tecnologie 3D, finalizzate a ridurre le distanze che si vengono a creare artificialmente fra utenti ed artefatti – come la *Virtual Reality* (VR) – è uno strumento estremamente appropriato per la simulazione visiva⁶⁸.

La rappresentazione grafica raggiungibile oggi, infatti, grazie allo sviluppo di registrazioni tridimensionali che sfruttano le tecniche ottiche di misura 3D, costituisce non soltanto un importante approdo in termini di riproduzione di archivi digitali per la documentazione e la conservazione, ma si estende al campo della visualizzazione, alla ricerca di esperienze sempre più interattive, multisensoriali ed autogestite.

La registrazione tridimensionale si pone, dunque, come un'attività chiave nella gestione di Beni archeologici, poiché il loro valore reale dovrebbe scaturire, *in primis*, proprio dalla capacità con cui si è in grado di estrarre informazioni utili da essi. Benché ciò non potrà prescindere, a questo punto, dalle forme di esplorazione volte a garantire similitudine percettiva e dimensionale col reale, la conoscenza del bene e la comprensione del suo significato, oltre che della sua evoluzione nel tempo, risulteranno possibili solo se tutte le informazioni pertinenti saranno adeguatamente catturate e codificate. Circostanze che si rivolgono, più che mai in archeologia, allo sviluppo completo di una tecnica di rilievo tridimensionale integrato che permetta la formulazione di procedure innovative di registrazione in grado di soddisfare a pieno le esigenze

del campo di applicazione specifico, ‘facilitando la definizione di nuovi paradigmi, di nuovi standard e quindi di nuovi progressi nella comprensione archeologica’⁶⁹.

1.7 Gestione dei beni archeologici: progetto interdisciplinare

Eseguire un progetto di registrazione tridimensionale con l'obiettivo di memorizzare il presente dei beni archeologici, così come essi sono stati modellati nel corso del tempo, significa fornire la *background* per ricostruirne innanzitutto il passato e per progettare la loro conservazione nel futuro. Finalità, queste, che riconducono comunque la creazione di modelli 3D ad un approccio metodologico sistematico dove la descrizione grafica di oggetti, monumenti o luoghi avviene ‘tramite uno specifico standard, per fornire una base affidabile senza determinati *input* soggettivi’⁷⁰.

Di conseguenza lo sviluppo degli strumenti di registrazione digitale del patrimonio non aggiunge soltanto la terza dimensione ad una metodologia che, invece, ne adopera essenzialmente due, colmandone il *gap* informativo, ma – a maggior ragione – ‘richiede di impostare la ricerca dell'intera filiera scientifica delle tecniche e dei metodi alla ricerca di *output*’⁷¹.

È una sfida che richiede, innanzitutto, di integrare il rilevamento 3D nello stesso progetto di gestione del patrimonio archeologico, non soltanto in qualità di prerequisito per l'intervento conservativo, ma come esperienza interattiva nei confronti dell'organismo studiato e base di riferimento dinamica per l'intero *team* che sviluppa la ricerca. Attività che, sempre maggiormente, dà importanza al ‘contesto’ obbligando ad adottare un approccio olistico e multiscale.

‘L'Archeologia si trova ad affrontare oggi con nuove e potenti metodologie di rilevamento’ oggetti e siti di interesse ‘a diverse scale di analisi e applicando varie tecniche integrate’⁷². Quindi un metodo che sappia giungere fino al singolo reperto partendo dalla lettura del territorio in cui è inserito e ponendo per ciascuna fase problematiche diverse; che garantisca l'utilizzo di strumentazioni di solito distinte, le quali operano spesso con precisioni non omogenee ed in sistemi di riferimento differenti, ri-

uscendo poi a confrontarli ed integrarli; fino a divenire un 'approccio territoriale globale, passando dalla priorità del sito a quella del contesto territoriale e paesaggistico, con interpretazioni multidisciplinari e multifattoriali; nel quadro di una tendenza più generale a considerare i sistemi di beni culturali come parte integrante e interconnessa del patrimonio territoriale'⁷³.

Per quanto concerne, invece, la dimensione olistica, a partire dal salto epistemologico compiuto oggi dall'archeologia verso un'azione interpretativa sempre maggiore nei confronti degli beni della propria scienza, è evidente la tendenza della ricerca di settore verso un approccio trasversale ed un'attività aperta a più professionisti.

Le testimonianze ereditate dal passato vengono sempre più intese come segni fisici, storici, artistici, linguistici e materiali da salvaguardare⁷⁴, sorgenti di informazioni che interagiscono fra loro in sistemi di relazioni complessi.

Così l'integrazione della registrazione, della documentazione e della gestione delle informazioni dei processi di conservazione richiede un coordinamento interdisciplinare tale che per essere efficace ed avere successo non basta che preveda solo un'attenta pianificazione, ma deve saper predisporre un coordinamento efficace a livello di sito alla ricerca di un contatto 'intimo' con il patrimonio. Si tratta, così, di ampliare il modo con cui si acquisiscono conoscenze: per esempio oggi, accanto allo scavo ed alla prospezione di superficie⁷⁵, crescente rilevanza assumono il rilievo, la documentazione storica, la storia dell'arte, la diagnosi, la geofisica, etc.

È evidente come lo scambio e la successiva verifica dei risultati ottenuti dalla ricerca, in primo luogo, costringano ad un'interdisciplinarietà⁷⁶, intendendo fornire analisi finalizzate alla risoluzione dei problemi di codifica e decodifica – come a quelli di raccolta, registrazione, elaborazione, conservazione e comunicazione dei dati informativi – le quali, certamente, non potranno avvenire singolarmente, né tantomeno in modo isolato.

*'Big science creates opportunities for collaboration and requires large interdisciplinarity teams, breaking down historical barriers to collaboration'*⁷⁷.

1.8 Organizzazione della ricerca: obiettivi e finalità

La tesi, articolata in sette capitoli, illustra l'esperienza di ricerca maturata durante il percorso di Dottorato. Fra gli obiettivi, il primo è stato quello di definire le potenzialità del rilievo tridimensionale nell'ambito dei Beni Archeologici, il secondo invece, di valorizzare l'interdisciplinarietà come linea guida dell'approccio di studio che ha permesso di rappresentare, documentare e leggere un eccezionale reperto etrusco come la Stele di Vicchio. Del resto, analogamente a tutti i processi conoscitivi di manufatti, è stato d'obbligo partire dall'analisi di forme e dimensioni, quindi dal rilievo. Ciò ha significato dunque produrre una rappresentazione tridimensionale attraverso il campionamento dello spazio denso e accurato che rappresenta la realtà con punti di cui sono note le coordinate, non solo per quanto concerne l'importante fine documentativo ma anche per la sua capacità di fornire output capaci di simulare compiutamente la realtà che ci circonda.

Oggi giorno tali questioni non possono essere opportunamente affrontate, né tantomeno discusse in modo approfondito, se queste non vengono supportate da un'esperienza olistica che sappia coniugare le diverse forme conoscitive interagenti nell'elaborazione di un progetto interdisciplinare aggiornato, efficiente ed effettivo, verso la determinazione di nuovi paradigmi di ricerca e, in tal caso, di nuove scoperte nella comprensione archeologica. Ecco che, ancor prima di parlare di *téchne*, la definizione dei presupposti filosofici alla base dell'esperienza conoscitiva, specie se riferita al più ampio campo del Patrimonio Culturale, non ha potuto certo esimersi dall'affrontare – in apertura – la questione percettiva e ed altri aspetti fondamentali nell'istituzione di una relazione rappresentazionale. Soprattutto se quest'ultima è declinata all'esigenze del rilievo metrico – a maggior ragione se esso è poi esteso alla terza dimensione – la definizione della *mimesis* fra realtà e modello, quale omologia fra forma e teoria (e quindi anche corrispondenza geometrica) esige irrevocabilmente di seguire rigorosi parametri di sistematizzazione, automatizzazione e standardizzazione del dato registrato.

Viene introdotto l'approccio al modello digitale tridimensionale come attuale strumento di lettura e gestione

a scale differenti del Patrimonio Culturale quale attività chiave nello specifico ambito dei Beni Archeologici.

Di seguito, nel secondo capitolo, ne sono definiti i sistemi di rilevamento finalizzati alla loro documentazione. Infatti, a partire dalle conoscenze sulla pratica dello scavo stratigrafico, sono descritte le operazioni di lettura, analisi e registrazione del contesto archeologico riunite nel metodo di rilevamento tradizionale, quale fondamentale strumento di ricerca integrata per la comprensione di un sito, di una sua unità stratigrafica, di una sua struttura architettonica o di un singolo reperto. La capacità di restituire una caratterizzazione del monumento, sia dal punto di vista fisico – quindi materico, strutturale e geometrico – che dal punto di vista di un contesto più ampio, è sempre stata connessa all'applicazione integrata di metodi di rilevamento attraverso cui poter ricavare non solo misure, ma anche controllare quantitativamente e qualitativamente le informazioni. Tuttavia il recente avvento delle tecniche di rilievo 3D si è dimostrato – e continua ad esserlo – particolarmente efficace per applicazioni nel campo dei Beni Archeologici. A differenza del rilievo diretto che si avvale di strumenti di misura semplici, il rilievo strumentale tipico delle discipline della geomatica, ovvero delle discipline che si occupano di misurare e restituire graficamente gli oggetti nello spazio, producendo sempre dati tridimensionali, costituisce in questo momento la metodologia migliore per documentare la realtà nelle sue forme e dimensioni. Nel panorama delle tecniche digitali la scelta di quelle che si sono dimostrate maggiormente performanti nelle applicazioni archeologiche individua nella fotogrammetria digitale e nei sistemi ottici attivi a scansione gli strumenti migliori per ricostruire la 'pelle' del monumento basandosi sulla realtà. Si è resa dunque necessaria la definizione delle rispettive metodologie d'impiego per entrambi i sistemi ottici non invasivi, affinché la loro *pipeline* applicativa in campo archeologico seguisse passaggi ben definiti dall'acquisizione e registrazione dei dati fino alla loro ricostruzione 3D e visualizzazione.

Nel terzo e nel quarto capitolo è stato quindi affrontato il processo che partendo dall'acquisizione del dato metrico, rispettivamente tramite sistemi basati sulle immagini e con sensori a scansione, giunge alla generazione di modelli 3D descrivendone le caratteristiche metodologiche

e tecnico-operative, oltre alle relative problematiche delle due tipologie di rilievo.

Nel capitolo 'Sistemi di acquisizione *image-based*: l'approccio fotogrammetrico', in particolare, dopo l'*exkursus* sulle origini della fotogrammetria e la sua evoluzione fino all'avvento digitale degli ultimi decenni, sono trattati gli aspetti teorici ed i principi proiettivi che stanno alla base di tale tecnica. Oggi l'integrazione del procedimento di restituzione fotogrammetrica digitale con la *Computer Vision* permette di ottenere *output* 3D estremamente accurati attraverso un flusso di operazioni che, se ben pianificate ed eseguite, conducono ad una fotografia tridimensionale della realtà. Nel quarto capitolo, invece, vengono descritti i 'Sistemi di acquisizione *range-based*: sensori ottici attivi'; partendo dalla loro storia sono delineati i principi di funzionamento di questi strumenti a scansione che impiegano la luce artificiale per ottenere le coordinate 3D dell'oggetto rilevato.

Nel capitolo seguente, il quinto, si entra nel merito del contesto archeologico a cui appartiene la Stele iscritta di Vicchio, oggetto del caso applicativo a cui in ultimo viene finalizzata la ricerca.

Lo studio delle caratteristiche peculiari del sito etrusco di Poggio Colla, attraverso la lettura delle emergenze archeologiche ed architettoniche rinvenute – che per ora testimoniano le fasi di vita di un importante santuario dal VII al II secolo a.C. – rappresenta una premessa indispensabile al fine del medesimo processo conoscitivo della Stele. Così sono illustrati i principali ritrovamenti attraverso cui poter ricostruire, e quindi conoscere, il profilo di questo importante insediamento sacro nella conca del Mugello. Dalla descrizione ed interpretazione dei dieci Contesti Rituali ivi testimoniati, ai numerosi reperti di bucchero, ceramica e bronzo, si giunge alla definizione di pratiche e costumi che hanno contrassegnato la storia del santuario di Poggio Colla.

Il ritrovamento della Stele iscritta di Vicchio, quale documento contenente informazioni decisive riguardo la religione, l'epigrafia e forse anche la lingua etrusca, si configura scoperta talmente importante da richiedere un completo progetto di documentazione, il cui *management* sappia coniugare le esigenze conservative del monumento con operazioni rilievo 3D finalizzate alla sua ricostruzione autentica. Nel caso applicativo sono spiegate

le scelte tecniche e metodologiche adoperate per catturare e ricostruire, con precisione metrica e morfologica, lo spessore sub-millimetrico delle iscrizioni presenti sulla superficie della Stele.

È descritto per fasi il progetto di documentazione, dalle operazioni di rilievo 3D, eseguito prima e dopo la fase di restauro, all'analisi dei risultati conseguiti dalla successiva elaborazione dei dati acquisiti finalizzata ad *output* finali sia di studio che per la musealizzazione.

L'ultimo capitolo illustra le conclusioni della tesi aprendo a futuri orizzonti di ricerca.

Note

1. *'dessinés et mesurés très exactement'* è la definizione con cui Antoine Desgodetz sottotitola la sua opera *'Les édifices anti-ques de Rome'*, stigmatizzando in cosa consistessero le precise operazioni di rilevamento già alla fine del XVII secolo. Ciò che l'architetto francese scrive in prefazione per descrivere il suo lavoro sarà ripreso e confermato, dopo un secolo e mezzo circa, da Quatremère de Quincy nel suo capolavoro *'Dictionnaire historique de l'architecture'*. In quest'ultimo la restituzione viene spiegata come una *'sorte de recherche'* che, mediante un'esatta osservanza delle misure di ciò che rimaneva del manufatto antico e delle sue singole parti, era volta a trovare e riprodurre i loro dettagli e le loro proporzioni in modo minuzioso. *'Le fini des dessins d'architecture consiste dans la pureté du trait, la fidélité des mesures, et la précision des proportions'*. (Cfr. Desgodetz A., *Les édifices antiques de Rome*, Paris, 1682, pp. 6-7; Quatremère de Quincy A.C., *Dictionnaire historique de l'architecture*, 1832, vol. 1, pp. 518-520 – vol. 2, pp. 375-376).

2. *'[...] sembra sempre più difficile concepire un sistema di linguaggio di immagini o di oggetti i cui significati possano esistere fuori dal linguaggio: per percepire ciò che una sostanza significa, si deve necessariamente ricorrere al lavoro di articolazione svolto dalla lingua: non c'è senso che non sia nominato, e il mondo dei significati non è altro che quello di linguaggio.'* (Cfr. Barthes R., *Eléments de sémiologie*, Seuil, Paris, 1964 – trad. it. *'Elementi di semiologia'*, ed. Einaudi, Torino, 1966, p. 14)

3. Cfr. H. Bergson, *Matière et mémoire: Essai sur la relation du corps à l'esprit*, 1911; trad. it. A. Pessina (a cura di), *'Materia e memoria: Saggio sulla relazione tra il corpo e lo spirito'*, ed. Laterza, 228 pp.

4. *'io penso, dunque sono, ossia esisto'* (Cfr. R. Descartes, *Discours de la Méthode*, 1637, IV; trad. it. *'Discorso sul metodo'*, ed. Mondadori, 1993, Milano, pp. 34. 90 e nota 6.

5. La rappresentazione con Descartes divenne sinonimo di idea: essa ha la sua realtà nello spirito, ma si riferisce alla realtà in sé della cosa rappresentata (Cfr. R. Descartes, *Meditationes*, III). Le idee, quindi, sono intese come l'oggetto immediato del pensiero stesso, cioè come la rappresentazione che il soggetto ha nell'atto di pensare. Tuttavia, non essendo riconosciuta alcuna autonomia a queste, analogamente a Platone, vengono

considerate dipendenti dall'atto del pensare proprio dell'oggetto, senza il quale non potrebbero esserci. I tre aggettivi usati per descrivere l'idea ne distinguono rispettivamente altrettante caratteristiche: *'innata'* perché corrispondente ad una realtà ricavabile con l'esclusivo esercizio del pensiero; *'avventizia'* (dal lat. *adventicius*, der. di *advenire*, arrivare) perché derivando, tramite la sensibilità, da oggetti esterni è indipendente dall'uomo; *'fittizia'* (dal lat. *facticius*, der. di *factus*, part. pass. di *figere*, immaginare) poiché immaginata dal soggetto medesimo.

6. *'I primi passi della rappresentazione, intesa come teoria e non come scienza, possono essere rintracciati a partire dal pensiero presocratico.'* (Cfr. F. Gil, *Rappresentazione*, in *'Enciclopedia Einaudi'*, ed. Einaudi, Torino, 1981, vol. XI, p. 546).

7. Cfr. J. Searle, *Vedere le cose come sono, una teoria della percezione*, ed. Raffaello Cortina, 2016, p. 69.

8. *'[...] Esiste una semiotica generale che non può e non intende investigare i meccanismi di funzionamento di specifici processi di semiosi e che si preoccupa di porre filosofico alcune categorie fondamentali, quali quella di semiosi, di segno, di rapporto di significazione, d'inferenza interpretativa e così via. Questa semiotica generale ha per scopo di mostrare la fondamentale unità di esperienze, per altri versi assai diverse, per quanto generalissimo sia il suo punto di vista e lontano l'obiettivo con cui mette a fuoco i dati molteplici delle nostre varie esperienze. Questa semiotica generale è una branca della filosofia o, meglio, è la filosofia intera in quanto impegnata a riflettere sul problema della semiosi'* (Cfr. U. Eco, *Semiotica e filosofia del linguaggio*, Conferenza data all'Università di Caracas, 1994, p. 4 – Einaudi, 1997, pp. XVII – 318).

9. L'approccio *'semiotico'* con cui si interpreta la corrispondenza fra rappresentazione e linguistica mette in luce il significato dei segni, come delle parole, considerando soprattutto il rapporto fra l'espressione e la realtà extra-linguistica. Così il campo d'interesse è semantico. Le tre parti del linguaggio: semantica, pragmatica e sintassi, si interessano rispettivamente di altrettante relazioni linguistiche. Mentre la prima - come appena detto - studia il significato delle parole, la seconda considera il linguaggio in rapporto all'uso fatto dal parlante e la terza, infine, analizza le relazioni che intercorrono fra gli elementi dell'espressione. Conseguentemente solo partendo da una pragmatica è possibile sviluppare una semantica e, da essa una sintattica che renda conto dei significati prodotti dai linguaggi.

10. *'La [...] mano ha seguito materialmente il segno di una visione mentale, incasellata, di convenzioni grafiche che gli uomini si trasmettono.'* (Cfr. C. Balistreri, *Il cielo era caramelluloso*, in C. Balestreri, G. Peronuzzi, E. R. Trincanato, '3 a 4, nel rilievo', Venezia, 1960-1980, pp. 9-12.

11. La rappresentazione fa comprendere l'esperienza empirica, la realtà viene mostrata in modo tale che possa diventare intellegibile.

12. L'origine latina del termine è significativa: *repraesentatio-onis* deriva dal participio passato di *repraesentare*, composto dal prefisso *re* 'di nuovo' e *praesens* 'presente'. Nell'evoluzione dalla forma classica a quella più volgare (*re-ad-praesentare*), fra prefisso e radice verbale viene interposta la particella *ad* 'a'.

13. Dall'origine etimologica del termine, che deriva dal verbo latino *relevare*, composto da *re* 'di nuovo' e *levare* 'alzare', 'alleggerire', 'sporgere', è possibile evincere due aspetti: il prefisso *re* – o *ri* – avendo una carattere intensivo, se da una parte esprime l'intenzionalità dell'accezione di raccogliere ciò che viene sollevato o che appare, dall'altra segnala un raddoppiamento: *'il 'rappresentare prendendo misure' è un ri-presentare l'architettura, ri-produrla, ri-costruirla nella spazialità analogica del disegno.'* (Cfr. M.L. Cannarozzo, R. Salerno, *Fotografia e Misura*, Cluva CittàStudi, Milano, 1991, cap. 1, pp. 31, 58)

14. *'In ogni forma di rappresentazione qualcosa si trova al posto di un'altra; rappresentare significa esser l'altro di un altro, che viene insieme evocato e cancellato dalla rappresentazione'* (Cfr. F. Gil, *Rappresentazione*, in *'Enciclopedia Einaudi'*, Torino, 1981, vol. XI, p. 546).

15. *Ibidem*, p. 544.

16. L'attività di pensare si svolge attraverso le idee ed *'essendo le idee come le immagini, non può essercene nessuna che non ci sembri rappresentare qualche cosa'* (Cfr. R. Descartes, *Meditationes de prima philosophia*, Soly, Paris – trad. it. in *'Opere'*, ed. Laterza, Bari, 1967, vol. I, p. 224)

17. Franz Clemens Honoratus Hermann Brentano (Boppard, 16 gennaio 1838 – Zurigo, 17 marzo 1917). Filosofo e psicologo tedesco, maestro di Edmund Husserl e Alexius Meinong, rimase sacerdote cattolico fino a quando fu coinvolto nel proclama intorno all'infallibilità papale del 1873.

18. Ed ancora oggi, l'intenzionalità pare rimanere al centro dell'attenzione filosofica (da Searle e D.C. Dennett a J. Fodor), essendo uno degli argomenti che maggiormente guardano alle questioni mentali e psicologiche, un tempo considerate analiz-

zabili solo in termini linguistici. Lo studio degli aspetti mentali legati al significato ha finito per rendere sovrapponibili le indagini di filosofia del linguaggio in senso stretto con quelle della filosofia della mente e un rilievo particolare ha acquisito, in questo ambito di intersezione tra le due sottoaree della filosofia, la problematica intenzionalità, cioè la caratteristica (teorizzata nel Medioevo ma riscoperta da Brentano) delle asserzioni linguistiche e degli stati mentali di essere tipicamente rivolti a oggetti extralinguistici o extramentali, cioè di avere un intrinseco contenuto. [Cfr. lemma 'filosofia analitica' da *Treccani Enciclopedia online* (<http://www.treccani.it/enciclopedia/>)].

19. Il filosofo, ingegnere e logico austriaco, Ludwig Josef Johann Wittgenstein (Vienna, 26 aprile 1889 – Cambridge, 29 aprile 1951), nel suo *Tractatus logico-philosophicus*, attinge dal linguaggio comune alcuni verbi adoperandoli come termini tecnici per spiegare le condizioni della possibilità rappresentazionale: fra questi 'presentare', 'esprimere', 'esibire', 'riflettere', 'progettare', 'designare', etc.

20. Sesto Empirico, *Contro i matematici*, VII, 241.

21. Secondo la terminologia di Friedric Ludwig Gottlob Frege (Wismar, 8 novembre 1848 – Bad Kleinen, 26 luglio 1925) è la significazione '*Bedeutung*' che determina 'il modo dell'esser dato del designato' (Cfr. F. G. Frege, *Logica e Matematica*, trad. it. di L. Geymonat, C. Mangione, Boringhieri, Torino, 1977, pp. 374-405).

22. 'Pensando ad un segno dovremo collegare ad esso due cose distinte: e cioè non soltanto l'oggetto designato, che si chiamerà "significato di quel segno", ma anche "senso del segno", che denota il modo in cui quell'oggetto ci vien dato'. Di norma – prosegue Gottlob Frege – 'i rapporti che intercedono fra segno, il suo senso, ed il suo significato sono questi: a un dato segno corrisponde in genere un senso determinato ed a questo corrisponde di nuovo un significato determinato; invece ad un dato significato (cioè ad un dato oggetto) non corrisponde sempre un unico senso. Anche a un dato senso corrisponde un unico segno: esso viene espresso in modi diversi nelle diverse lingue' e talvolta addirittura nello stesso linguaggio' (Cfr. G. Frege, *Aritmetica e Logica*, trad. it. L. Geymonat, ed. Giulio Einaudi, Torino, 1948, pp. 218-219). Se il significato di un segno è un oggetto percepibile coi sensi, la rappresentazione che ho di esso è invece un'immagine soggettiva, originatasi dal ricordo sia delle impressioni sensoriali individuali provate, sia delle attività esercitate, tanto interne quanto esterne. D'altronde al medesimo senso non viene collegata sempre la medesima

rappresentazione, neanche nella stessa persona. In un linguaggio il significato di una parola è l'oggetto che noi indichiamo con essa; la rappresentazione che ne abbiamo è invece completamente soggettiva. Fra l'uno e l'altro sta il senso, il quale non è più soggettivo come la rappresentazione ma nemmeno coincide con l'oggetto stesso. Partendo da queste riflessioni logiche sarebbe possibile spiegare come una rappresentazione possa venir assunta essa stessa quale oggetto, e come però questa risulti diversa in base da chi la osserva. Tuttavia lo sviluppo di tale parallelismo condurrebbe fuori dal contesto di pertinenza della tesi.

23. Cfr. V. Ugo, *μίμησις - mimesis. Sulla critica della rappresentazione dell'architettura*, ed. Maggioli, Milano, 2008, p. 21.

24. ...specie in ambiti come quello della rappresentazione architettonica.

25. '*des correspondances fonctionelles propement analogues, au sens mathématique du terme. Selon ce vocabulaire, c'est sur l'homologie que repose l'elaboration de modèles conceptuels et la possibilité de transferts de lois structurellement semblables hors du domaine initial de leur vérification. [...] Dans le mathématiques modernes, construire un modèle c'est traduire une théorie dans le langage s'une autre, mettre en correspondance des termes avec conservation de relations. [...] en aucun cas, la réalisation concrète d'un modèle ne prétend à la valeur d'une représentation figurative des phénomènes [...] Ce qu'on doit demander à un modèle c'est la fourniture d'une syntaxe pour construire un discours transposable mais original. [...] Dans tous les cas, il n'y a d'analogie valable qu'au sein d'une théorie*' (Cfr. G. Caunguilhem, *Modeles et analogies dans la découverte en biologie*, in 'Études d'Histoire et de Philosophie des Sciences', Vrin, Paris, 1970, pp. 304-318).

26. Cfr. B. Aterini, *Appunti dalle lezioni del corso di Fondamenti ed Applicazioni della Geometria Descrittiva*, ed. Alinea, Firenze, 2000, pp.15-19.

27. L'*haecceitas* è ciò che fa di una cosa questa – *haec* in latino – cosa particolare, ovvero essa è l'essenza di 'ciò che la cosa realmente è' (Cfr. R. Maserio, R. Codello (a cura di), *Materia signata/haecceitas*, ed. Angeli, Milano, 1990).

28. L'origine latina della parola, dal sostantivo neutro *patrimonium*, derivato da *pater-tris* 'padre' e *munus* 'compito', indicava le 'cose appartenenti al padre'.

29. Il primo riconoscimento ufficiale ed internazionale nei confronti del patrimonio culturale ed in particolare per i beni

materiali che lo compongono, si ebbe durante la *Convenzione sulla protezione dei beni culturali nei conflitti armati* adottata all'Aia nel 1954 e firmata da quaranta Stati. Successivamente, nel 1970, l'UNESCO stabilì quali misure adottare per 'interdire e impedire l'illecita importazione, esportazione e trasferimento di proprietà dei beni culturali', considerando 'beni culturali i beni che, a titolo religioso o profano, sono designati da ciascuno Stato come importanti per l'archeologia, la preistoria, la storia, la letteratura, l'arte o la scienza' [Cfr. Art. 1, *Convenzione concernente le misure da adottare per interdire e impedire l'illecita importazione, esportazione e trasferimento di proprietà dei beni culturali*, Parigi, 17 novembre 1970 (www.unesco.it)].

30. [...] non può essere considerato come un fattore da cui le civiltà sono generate. È chiaro che una combinazione virtualmente identica dei due elementi dell'ambiente può originare una civiltà in un caso e mancare di originare una civiltà in un altro, senza che sia possibile da parte nostra spiegare questa differenza assoluta nel sorgere con qualche sostanziale differenza nelle circostanze.' (Cfr. A. Toynbee, *A study of History*, riassunto dei volumi I-VI da parte di D.C. Somerwell, Oxford University Press, 1947; trad. it. *Le Civiltà nella Storia*, Einaudi, Torino 1950, I, p. 269). In tale ambito il termine 'ambiente' viene inteso 'totale' poiché riferito all'insieme dei beni culturali e naturali.

31. Cfr. K. Goldstein, *Der Aufbau des Organismus*, Nijhoff, Den Haag 1934; trad. fr. *La Structure de l'organisme*, Paris, 1951, p. 250).

32. Cfr. D. Manacorda, *Lezioni di archeologia*, ed. Laterza, Bari, 2008, p. 13.

33. '... sono considerati «patrimonio culturale»: i monumenti: opere architettoniche, plastiche o pittoriche monumentali, elementi o strutture di carattere archeologico, iscrizioni, grotte e gruppi di elementi di valore universale eccezionale dall'aspetto storico, artistico o scientifico; gli agglomerati: gruppi di costruzioni isolate o riunite che, per la loro architettura, unità o integrazione nel paesaggio hanno valore universale eccezionale dall'aspetto storico, artistico o scientifico; i siti: opere dell'uomo o opere coniugate dell'uomo e della natura, come anche le zone, compresi i siti archeologici, di valore universale eccezionale dall'aspetto storico ed estetico, etnologico o antropologico. [Cfr. Art. 1, UNESCO, *Convenzione sulla Protezione del Patrimonio Mondiale, culturale e naturale dell'Umanità*, Parigi, 22 novembre 1972 (www.unesco.it)].

34. Cfr. V. Bonora, G. Tucci, *Il laser scanner terrestre e il rilievo dei Beni Culturali*, in F. Sacerdote, G. Tucci (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', ed. Alinea, Firenze, 2007, p. 89.

35. Cfr. AA. VV., *Recording, Documentation and Information Management for the Conservation of Heritage Places*, J. Paul Getty Trust, Los Angeles, 2007, vol. II. Il contributo del Comitato scientifico internazionale ICOMOS sulla documentazione del Patrimonio (CIPA) è stato notevole offrendo un'ottima guida circa la sua gestione, oltre che per le relative tecniche tridimensionali di cattura e di diffusione (<http://cipa.icomos.org>). Da oltre 40 anni, infatti il CIPA promuove convegni ed eventi per il confronto e lo scambio dei progetti di ricerca inerenti alla documentazione del patrimonio a livello internazionale.

36. Cfr. M. Bini, *Verso il rilievo automatico*, in F. Sacerdote, G. Tucci (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', ed. Alinea, Firenze, 2007, p. 127.

37. Cfr. M. Gaiani, *Smart City: dal rilievo ex-post al rilievo ex-ante*, in M. Unali, 'Atlante dell'Abitare Virtuale. Il Disegno della Città Virtuale, fra Ricerca e Didattica', ed. Gangemi, Roma, 2014, p. 117.

38. C. Cundari, *Censimento e catalogazione dei beni culturali*, in G. Fano (a cura di), 'Censimento e catalogo dei Beni Culturali', ed. SAFRA, Bari, 1982, p. 82.

39. M. Gaiani, *Smart City: dal rilievo ex-post al rilievo ex-ante*, op. cit., p. 117.

40. Cfr. M. Bini, *Verso il rilievo automatico*, op. cit., p. 129.

41. Si tratta, in effetti, di una componente fondamentale nel processo di pianificazione della conservazione e fornisce una base a lungo termine per il monitoraggio, la manutenzione e la gestione di un sito.

42. Cfr. M. Bini, *Verso il rilievo automatico*, op. cit., p. 127.

43. Cfr. C. Monti et al., *Per un moderno rilievo della basilica di San Lorenzo tra opera, progetto e trasformazioni*, in L. Fieni (a cura di), 'La costruzione della basilica di San Lorenzo a Milano', ed. Silvana, Milano 2004, pp. 225-241.

44. Basti pensare al rilievo fotogrammetrico dell'architettura, ove la sicurezza delle informazioni registrate nelle fotografie sconta l'arbitrarietà della lettura effettuata dal restituitista quando riconosce i contorni delle forme.

45. È un modello discontinuo, a differenza di quello poligonale continuo; infatti, mentre la nuvola di punti è un 'modello numerico, discreto, discontinuo e imperfetto', il secondo è un

‘modello matematico, continuo perfetto’ (Cfr. R. Migliari, *Per una teoria del rilievo architettonico*, in R. Migliari (a cura di), ‘Disegno come modello’, ed. Kappa, Roma, 2004, p. 63).

46. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, ed. Ermes, Ariccia (RM), 2015, p. 420.

47. Il modello ricavato dal rilievo stereo-fotogrammetrico tuttavia ‘può ancora iscriversi nell'alveo delle condotte “tradizionali” del rilievo, perché opera derivando misure e forme dai caratteri e dalle conformazioni dell'architettura’ (Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 422).

48. Ibidem, pp. 420-421.

49. Cfr. M. Bini, *Verso il rilievo automatico*, op. cit., p. 129.

50. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura*, op. cit., p. 42.

51. ‘*Cet art a deux objets principaux: Le premier est de représenter avec exactitude, sur le dessins qui n'ont que deux dimensions, les objets qui on trois, et qui son susceptibles de définition rigoureuse. Sous ce point de vue, c'est une langue nécessaire à l'homme de génie qui conçoit a projet, à ceux qui doivent en diriger l'exécution, et enfin aux artistes qui doivent eux-mêmes en exécuter les différentes parties. Le second objet de la Géométrie descriptive est de déduire de la description exacte des corps tout ce qui suit nécessairement de leurs formes et de leurs positions respectives. Dans ce sens, c'est un moyen de rechercher la vérité; elle offre des exemples perpétuels du passage du connu à l'inconnu*’ (Cfr. G. Monge, *Géométrie descriptive*, Paris, 1799, *Programme*, p. xvj).

52. Il riferimento alla geometria descrittiva pare più che mai opportuno, quale disciplina che riesce a descrivere gli oggetti definendo un rigoroso modello grafico nello spazio; ovvero ‘un metodo scientifico che non fornisce soltanto le immagini di punti e rette, ma permette anche l'individuazione di questi nello spazio in quanto assicura la corrispondenza biunivoca fra foglio da disegno, bidimensionale, e spazio tridimensionale, in maniera che una dato oggetto nello spazio abbia una determinata rappresentazione ed essa soltanto, e che, viceversa questa sia la rappresentazione dell'oggetto dato e di esso soltanto’ [Cfr. F.I. Apollonio, *Geometria descrittiva e disegno tecnico nell'era della rivoluzione industriale*, in AA.VV., ‘Rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente: principi costruttivi del progetto tra artificio e natura’, MURST, Rodano (MI), 1998, p. 86]. ‘È la geometria descrittiva che sviluppa la capacità di pensare nello spazio tridimensionale e permette, grazie ai metodi di rappresentazione, di disegnare su una superficie

piana le forme deli oggetti che ci circondano.’ (Cfr. B. Aterini, *Introduzione ai Metodi di Rappresentazione della Geometria Descrittiva*, ed. Alinea, Firenze, 2009, p. 9).

53. Cfr. B. Aterini, *Il ruolo dello “strumento” geometria nella lettura e nella rappresentazione dell'architettura*, in B. Aterini, R. Corazzi (a cura di) ‘La geometria tra didattica e ricerca’, ed. AREA Firenze, Firenze, 2008, pp. 44-50.

54. Questi ‘mostra ampiamente la corda quando si tratta di dover rappresentare con fedeltà artefatti tipicamente a forma libera come sono solitamente le rovine archeologiche. Il “misura e disegna” tradizionale procede, infatti, per sezioni, ricostruite trilaterando, oppure triangolando, ma comunque riferendo la misura a quella sezione verticale o orizzontale. In questo modo un manufatto nello spazio figurativo del disegno è costantemente iscritto come “estrusione” di una “pianta” o “proiezione” di un alzato’ (Cfr. F.I. Apollonio, M. Gaiani, F. Remondino, *Una pipeline per l'acquisizione di dati 3D*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), ‘Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei’, Edizioni della Normale, Pisa, 2010, p. 39)

55. Cfr. G. Geymonat, G. Giorello, *Modello*, in ‘Enciclopedia Einaudi’, ed. Einaudi, Torino, 1981, vol. IX, p. 384.

56. Cfr. A. Moles, *Teoria informazionale dello schema*, in A.A. V.V., ‘Versus’, n. 2, 1972, pp. 29-37.

57. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura*, op. cit., p. 425.

58. ‘note le procedure di acquisizione e tolleranza, il modello numerico [...] deve considerarsi un dato oggettivo, ripetibile a parità di condizioni e valido scientificamente’ (Cfr. Ibidem, p. 428).

59. Agendo di fatto un campionamento che si serve di punti.

60. Cfr. L. De Luca, *La fotomodellazione architettonica*, ed. Dario Flaccovio, Palermo, 2011, cap. 4, p. 107.

61. Con il termine si intende, appunto, la mappatura di una o più informazioni 2D (solitamente immagini a colori dell'oggetto o della scena modellati) sulla geometria 3D per produrre un risultato foto-realistico (Cfr. S. Baldassini, M. Gaiani, F. Remondino, *Rilievo, gestione e mappatura del colore*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), ‘Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei’, op. cit., pp. 219-235).

62. La metodologia basata sul concetto di organizzazione dell'informazione 3D tramite semantica, nel caso di un monumento archeologico, ad esempio, consente di raggiungere importanti esiti in termini di scomposizione nei vari singoli

elementi costitutivi, riconoscibili attraverso l'analisi della loro geometria; di aggiunta delle informazioni linguistiche legate al riconoscimento dei segni e di un linguaggio architettonico condiviso, etc. – consentendo di assistere il lavoro dell'archeologo durante gli scavi. (Cfr. F.I. Apollonio, M. Gaiani, A.M. Manfredini, *Modellazione semantica metodi a multirisoluzione*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), ‘Modelli digitali 3D in archeologia’, op. cit. pp. 237-249).

63. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura*, op. cit., p. 425.

64. Cfr. Ibidem, p. 431.

65. Cfr. M. Bini, *Verso il rilievo automatico*, op. cit., p. 128.

66. Cfr. AA. VV., *Recording, Documentation and Information Management for the Conservation of Heritage Places*, J. Paul Getty Trust, Los Angeles, 2007, vol. I, p. XV.

67. Cfr. J. A. Barceló, *3D modelling and shape analysis in archaeology*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), ‘3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage’, Archaeopress, BAR S2598, 2014, p. 15.

68. Cfr. F.I. Apollonio, M. Gaiani, F. Remondino, *Una pipeline per l'acquisizione di dati 3D*, op. cit. p. 39

69. Cfr. S. Campana, *3D Modelling in archaeology and cultural heritage – theory and best practice*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), ‘3D Recording and Modelling...’, op. cit., p. 7.

70. Il riferimento alla definizione di rilievo data dall'*English Metric Survey Team* – cioè ‘la descrizione grafica di edifici e territorio tramite uno specifico standard ...’ – sottolinea l'importanza del processo di misura impiegando metodi noti e ripetibili.

71. Cfr. B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), *Modelli digitali 3D in archeologia*, op. cit., p. 7).

72. Cfr. G. Bitelli, V.A. Girelli, F. Remondino, L. Vittuari, *The potential of 3D techniques for Cultural Heritage object documentation*, in J.A. Beraldin, F. Remondino, M.R. Shortis, ‘Proceedings of spie – The International Society for Optical Engineering 6491’, Videometrics IX, San Jose, CA-USA, pp. 10.

73. ‘[...] ciò comporta, ad esempio, i passaggi concettuali dal museo all'ecomuseo, dal centro storico al territorio storico, dalle eccellenze paesaggistiche ai paesaggi rurali e urbani nella loro integrità territoriale, ambientale e di uso sociale (mondi di vita delle popolazioni, secondo la Convenzione europea del paesaggio)’ (Cfr. A. Magnagni, in *Manifesto*, 4 febbraio 2012).

74. L'approccio olistico, per comprenderne l'importanza, è fondamentale anche per la salvaguardia degli stessi beni (Cfr. M.S. Quintero, Introduction, in F. Remondino, S. Campana (a

cura di), *3D Recording and Modelling...*, op. cit., p. 3).

75. Che è sempre più integrata fra Sistemi Informativi Geografici (GIS).

76. Introdotto da Jean Piaget (Neuchâtel, 1896 – Ginevra, 1980) nel 1970, il termine consiste in metodo di approccio culturale trasversale e collaborativo fra le varie discipline di studio, finalizzato all'analisi ed alla comprensione della complessità del presente; in grado di abbracciare competenze di più discipline di studio, come la storia, l'archeologia, la geografia, l'architettura, l'ingegneria, etc., evidenziandone il loro processo di integrazione e creando nuove opportunità di collaborazione.

77. L'archeologo americano, il prof. Herbert D.G. Maschner, intervenendo durante il convegno inaugurale del Centro di Competenza NEMECH ‘New Media for Cultural Heritage’ tenutosi a Firenze (22 luglio 2015 - <http://nemech.unifi.it>), ha evidenziato come l'applicazione delle tecnologie digitali e dell'informazione al patrimonio culturale possa consentire a nuove forme di interattività tra soggetti ed ambienti, aprendo ad una rete di collaborazioni sempre più ampia, ovvero ad una concreta interdisciplinarietà.



2. Sistemi di rilevamento per l'archeologia

L'archeologia è la scienza che ha come obiettivo la ricostruzione delle antiche civiltà attraverso lo studio delle testimonianze materiali. L'acquisizione di queste conoscenze può avvenire tramite lo scavo nel terreno o l'analisi dei resti in superficie, se non addirittura dei monumenti. Quindi l'archeologia può essere vista come un metodo di ricostruzione storica.

È certo che la ricerca archeologica è strettamente connessa con le istanze di conservazione e di restauro delle emergenze indagate ai fini di limitare la perdita dei dati, preservando quanto più possibile, le testimonianze del passato. Inoltre i beni archeologici vengono studiati nell'ambiente in cui sono inseriti, poiché interconnessi con il territorio.

Le specificità di approccio e la tradizione storiografica hanno determinato la consueta suddivisione secondo ambienti storici e geografici, dando così luogo a vari rami dell'archeologia¹ ai quali si affiancano ambiti di ricerca specifici per tecnologie o per tipologie di reperti². La ricerca in questo momento storico è focalizzata sull'individuazione delle potenzialità del rilievo integrato ad alta risoluzione per la caratterizzazione del sito e del manufatto archeologico, con un'impostazione interdisciplinare e multi-metodologica, per fornire una documentazione misurabile, ma al tempo stesso facilmente interpretabile, in base alle diverse esigenze di conoscenza, tutela, conservazione e valorizzazione.

Come già anticipato nella parte introduttiva è possibile considerare, infatti, il rilievo quale operazione preliminare necessaria per la conoscenza di un oggetto, in ogni ambito di analisi rivolta al recupero, alla conservazione, alla valorizzazione o alla catalogazione dei beni architettonici, archeologici ed ambientali. Esso permette di individuare, analizzare ed evidenziare la forma, la struttura o i singoli elementi di un manufatto, così come le relazioni tra le parti che lo compongono, le caratteristiche materiche e cromatiche, lo stato di conservazione o, nel caso,

le situazioni di criticità, mettendo in risalto anche il suo legame con l'ambiente in rapporto alle testimonianze storiche.

Lo scopo finale dell'operazione metodologica del rilievo è sempre stata la riproduzione dell'oggetto studiato tramite la sua rappresentazione grafica; questa deve rispondere a determinati propositi, a seconda delle molteplici finalità del rilievo stesso, perché numerosi sono gli ambiti d'indagine di un oggetto inteso come documento storico od artistico. Se l'indagine storica, infatti, indaga le modalità con le quali l'organismo si è formato nel tempo, come si è mantenuto, le trasformazioni che ha subito; quella artistica ricerca l'effettiva possibilità di cogliere i dettagli materici e cromatici determinanti per l'unicità del riconoscimento artistico dell'opera; l'indagine conservativa mira alla comprensione dei fenomeni di alterazione e degrado, per poter individuare le soluzioni più adeguate; la ricerca divulgativa, invece, si prefigge l'obiettivo della maggior fruibilità dell'oggetto stesso; l'analisi progettuale, infine, fa sì che il rilievo possa essere considerato come un 'processo inverso' finalizzato alla ricostruzione del progetto.

Oggi l'avvento delle tecnologie di rilievo digitale nell'ambito dei Beni Culturali ha permesso un'acquisizione di dati molto più accurata, secondo criteri di oggettività maggiori rispetto al passato. In generale questo posticipa la fase interpretativa-soggettiva e toglie il limite imposto dalla sua posizione preliminare in cui si doveva decidere, fin dall'inizio del processo di rilevamento, quali fossero i dati da acquisire condizionando, però, con tale scelta il risultato finale. Si tratta, dunque, di un'importante differenza nella metodologia del rilevamento che apre le porte ad un'estensione dell'analisi verso sempre maggiori campi applicativi.

La quantità e la qualità dei dati spaziali, ovvero tridimensionali, che è possibile ricostruire attraverso le tecniche di rilievo digitale, non solo paiono superare di gran lun-

Fig. XII – Nelle pagine precedenti, vista della Stele di Vicchio nei locali del Centro di Restauro a Firenze, dove sono state acquisite le immagini per il rilievo fotogrammetrico.

ga la risposta data dalle tecniche di rilievo tradizionali, ma garantiscono maggiormente le finalità documentative e conservative del patrimonio, permettendone una scrupolosa selezione.

2.1 Il rilevamento archeologico

In archeologia, come in architettura, il rilevamento è uno strumento di ricerca fondamentale per la comprensione di un sito, di uno scavo, o di un reperto. Esso deve fornire 'una documentazione eccellente, ineccepibile, ricettiva di tutte le sollecitazioni, i riflessi psicologici e di tutti i ricordi che l'opera architettonica può suggerire'³. Infatti 'l'indagine sui resti materiali, sparsi nel territorio o stratificati negli archivi del sottosuolo, prevede un percorso scandito dalle tappe dell'individuazione, della raccolta, della descrizione e dell'organizzazione dei dati, finalizzate al raggiungimento di un'interpretazione storicamente valida'⁴.

Il rilevamento archeologico, sostanzialmente, può essere sintetizzato in due parti in funzione dell'oggetto da rilevare costituite, rispettivamente, dalle strutture architettoniche dislocate in siti di scavo oppure dalle medesime aree di scavo. Per quanto riguarda le strutture architettoniche fuori terra, anche parzialmente crollate, il rilevamento segue i principi generali di quello architettonico⁵. Infatti, anche se integrato secondo metodologie relative all'oggetto ed alla specificità del luogo, sarà organizzato secondo un preciso progetto di rilievo che prevede la definizione della poligonale d'inquadramento, l'eventuale ancoraggio alla rete topografica nazionale, le trilaterazioni e le triangolazioni per il corretto posizionamento delle parti architettoniche fuori terra; inoltre l'impiego di più metodi di misurazione, diretta od indiretta, in relazione alla particolarità ed alla morfologia di tali strutture. Anche le parti che via via emergeranno da un eventuale scavo saranno rilevate in tal modo e dovranno entrare a far parte del quadro planimetrico già rilevato.

Se, invece, si tratta di aree di scavo il rilevamento procede di pari passo con esso, anzi ne deve essere parte integrante, tanto che la figura del rilevatore deve confrontarsi con quella dell'archeologo esperto di 'scavi stratigrafici' anche perché è importante conoscere l'area

da rilevare dal punto di vista storico e non solo geografico. Infatti lo 'scavo stratigrafico' è il procedimento elaborato in archeologia per raccogliere e documentare i dati, disponibili in un determinato sito, relativi alle attività umane che vi hanno avuto luogo ed all'ambiente con cui hanno interagito. Tale metodo è stato elaborato a partire dal concetto di stratigrafia⁶, individuato in geologia, per cui le rocce si depositano in strati sovrapposti: le più antiche si trovano alla base ricoperte da quelle più recenti. Così gli strati di terreno, che si sono nel tempo depositati in un sito, permettono di stabilire la successione cronologica dei manufatti ivi rinvenuti.

L'identificazione del contesto stratigrafico in cui è stato ritrovato un reperto è, dunque, fondamentale per permettere agli archeologi di trarre conclusioni sul sito, sulla natura e sulla data della sua occupazione.

Appare importante sottolineare che affrontando uno scavo stratigrafico è necessario evidenziare la situazione di partenza del luogo; successivamente si devono valutare gli avvenimenti che ne hanno modificato l'aspetto: ogni azione umana e ogni evento naturale, hanno lasciato in un sito una traccia che si sovrappone alla situazione preesistente e costituisce una 'unità stratigrafica'.

Le unità stratigrafiche, a seconda che siano effetto di un evento naturale o di un'azione umana, si suddividono in 'naturali' (deposito alluvionale, crollo di un muro) e 'artificiali' (deposito di immondizia, costruzione di un muro, scavo di un fossato).

Inoltre sono dette 'positive' se comportano accumulo di materiali rispetto alla situazione preesistente (deposito alluvionale, accumulo d'immondizia, costruzione di un muro), altrimenti, in caso di asporto, 'negative' (scavo di un fossato, crollo di un muro).

La traccia di accumulo che costituisce un'unità stratigrafica positiva ha una consistenza fisica (lo 'strato' di immondizia o di fanghiglia, il muro), invece la traccia di asporto che costituisce un'unità stratigrafica negativa è rappresentata dalla superficie di 'taglio' immateriale lasciata dallo scavo del fossato o dalla rottura del muro. Esistono anche altri tipi di classificazione delle unità stratigrafiche: per esempio le unità stratigrafiche positive possono essere inserite nelle categorie 'costruzione' (il muro), 'piano di frequentazione' (l'alterazione della superficie di uno strato in seguito al calpestio che rende

il terreno più compatto, o battuto), 'riporto artificiale', 'deposito naturale', 'strato di crollo', 'strato d'incendio'. Le unità stratigrafiche presentano tra loro delle relazioni 'fisiche'⁷, l'insieme di queste e la loro concatenazione vengono tradotte in una sequenza cronologica tramite uno schema della successione cronologica - dal più recente al più antico - che tradotto graficamente, viene chiamato *matrix* o 'diagramma stratigrafico'⁸.

Durante uno scavo si opera partendo dall'unità stratigrafica più recente e si procede via via ad asportare gli strati seguendone l'ordine cronologico, dal più recente al più antico, fino ad arrivare ad uno strato naturale inalterato e archeologicamente sterile. Si distinguono gli strati sulla base delle loro caratteristiche fisiche, quali composizione, consistenza, colore codificato (Codice Munsell⁹), etc., e s'individuano i reciproci rapporti fisici (quale strato si sovrappone all'altro) per riconoscere quello più recente che dovrà essere asportato per primo.

Poiché lo scavo comporta la distruzione dell'oggetto osservato (lo strato di terra viene asportato ed eliminato nel corso del procedimento e lo stesso vale per i limiti di una fossa che costituiscono un'unità stratigrafica negativa) è di fondamentale importanza raccogliere con precisione tutti i dati disponibili. Perciò per ogni unità stratigrafica, individuata da un numero, viene redatta una pianta che ne riporta i limiti e la posizione e poi la si inserisce nelle sezioni. A questa documentazione grafica si aggiunge anche una documentazione fotografica.

D'altronde per documentare le ricerche archeologiche la fotografia è da sempre uno degli strumenti più importanti anche per la semplicità d'impiego. Infatti lo scavo muta nel tempo, per cause naturali o per la progressione della ricerca, quindi risulta di fondamentale importanza creare un archivio cronologico di immagini di agevole consultazione. Per ogni unità stratigrafica si redige una scheda nella quale vengono riportate tutte le informazioni, dal tipo, alla descrizione delle sue caratteristiche, a tutte le relazioni fisiche con le altre unità stratigrafiche, all'elenco dei materiali raccolti, ai risultati di eventuali analisi, ecc. Successivamente i dati raccolti sono utilizzati per la determinazione della 'sequenza stratigrafica', che corrisponde alla sequenza degli eventi verificatisi sul sito oggetto di scavo. Questa fornirà quindi la cronologia relativa di tutte le unità stratigrafiche, mentre una

datazione assoluta sarà fornita dai materiali raccolti in ciascuno strato.

Durante lo scavo la terra deve quindi essere attentamente esaminata per raccogliere sistematicamente tutti i frammenti di manufatti e i reperti faunistici e botanici che dovranno essere attribuiti all'unità stratigrafica di provenienza e conservati accuratamente separati strato per strato.

Ogni frammento, ripulito, siglato e, se necessario, sottoposto a restauro dovrà essere studiato e datato. È necessario, inoltre, valutare attentamente la coerenza cronologica di tutti i frammenti ritrovati nello strato e nelle altre unità stratigrafiche correlate. Tutti i dati saranno interpretati, la sequenza stratigrafica, datata dai materiali, ossia la successione degli eventi accaduti nel sito, dovrà essere articolata per fasi cronologiche coerenti ed inserita nel contesto storico locale e generale.

I risultati ottenuti dovranno essere pubblicati e infine tutto il materiale significativo dovrà essere conservato in deposito e la documentazione archiviata, in modo da consentire a chiunque in futuro di accedere ai dati raccolti. Se è vero che tutto ciò compete, in particolare, allo studioso di archeologia che, comunque, quando si appresta ad effettuare una campagna di scavo ha un obiettivo ben preciso ed adeguate conoscenze, cioè ipotesi di partenza e dati storici, è altrettanto certo che la figura del rilevatore è di fondamentale importanza fin dalla fase che precede le operazioni di scavo, quando si deve delineare sul terreno un grigliato di base, solitamente a maglia quadrata, per avere un riferimento preciso e facilmente gestibile che permetta la raccolta del maggior numero possibile d'informazioni.

Successivamente si andranno ad individuare una direzione di scavo che, in genere, coincide con un lato del grigliato, ed un piano di riferimento orizzontale, scelto opportunamente facendo riferimento al punto più alto del sito da scavare. A questo punto sarà possibile, tramite il grigliato, la direzione ed il piano orizzontale individuati, determinare tre coordinate a cui riferire la posizione di qualsiasi oggetto rinvenuto.

Nel rilievo archeologico come, del resto, in quello architettonico valgono i concetti principali, cioè la necessità d'integrare più metodi di rilevamento in base a ciò che si deve studiare per avere non solo le misure, ma con-

trollare anche quantitativamente e qualitativamente le informazioni.

In quest'ambito si apre anche un'altra questione, quella legata ai problemi di trasmissione del dato, ove le caratteristiche grafiche, in particolare per la rappresentazione in pianta ed in sezione, pur rimanendo di facile lettura, devono essere sintetizzate. In tal senso l'adozione di simboli adeguati permette di documentare materiali e stato di conservazione di essi. Tali rappresentazioni, anche se schematiche, andranno a far parte della lettura integrata dell'oggetto. Dunque possiamo affermare che in campo archeologico appare sostanziale l'esecuzione di planimetrie con la maggior quantità d'informazioni possibili, perché esse rappresentano la base fondamentale su cui lavorare. Infatti le piante su cui si riportano le indicazioni del ritrovamento costituiscono una specie di diario giornaliero dello scavo, un registro su cui basare la ricerca, fondamentale nel comprendere l'evoluzione del sito archeologico nel tempo e nello spazio. In quest'ambito le sezioni integrano e sviluppano la rappresentazione dei dati raccolti. Spesso si rappresentano anche i prospetti per evidenziare i materiali impiegati ed il loro stato di conservazione, ma il disegno deve comunque essere semplice e diretto, privo di effetti chiaroscurali.

In questi grafici si adottano le convenzioni usate per la rappresentazione del rilievo architettonico e si devono individuare posizione e stato degli strati archeologici, nonché dei reperti rinvenuti, al fine di ricostruire la storia del sito.

2.2 Le metodologie e gli strumenti di rilievo per la costruzione di modelli 3D

Negli ultimi anni l'applicazione delle tecniche di rilievo digitale nel campo dei Beni Culturali – e soprattutto in archeologia – ha riscosso una tale diffusione che il panorama delle possibili metodologie da potere adottare, per ricostruire la 'pelle' dei manufatti da rilevare, è divenuto notevolmente ampio. La varietà delle tecniche 'geomatiche'¹⁰ a disposizione, tuttavia, comporta una maggiore esperienza e considerazione dei vari parametri nella scelta degli approcci, delle metodologie e degli strumenti corretti che debbono essere impiegati; infatti nessuno

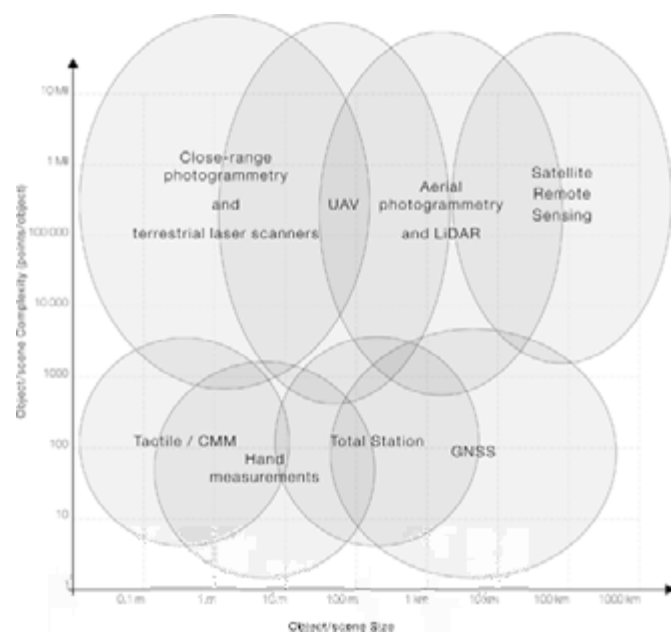


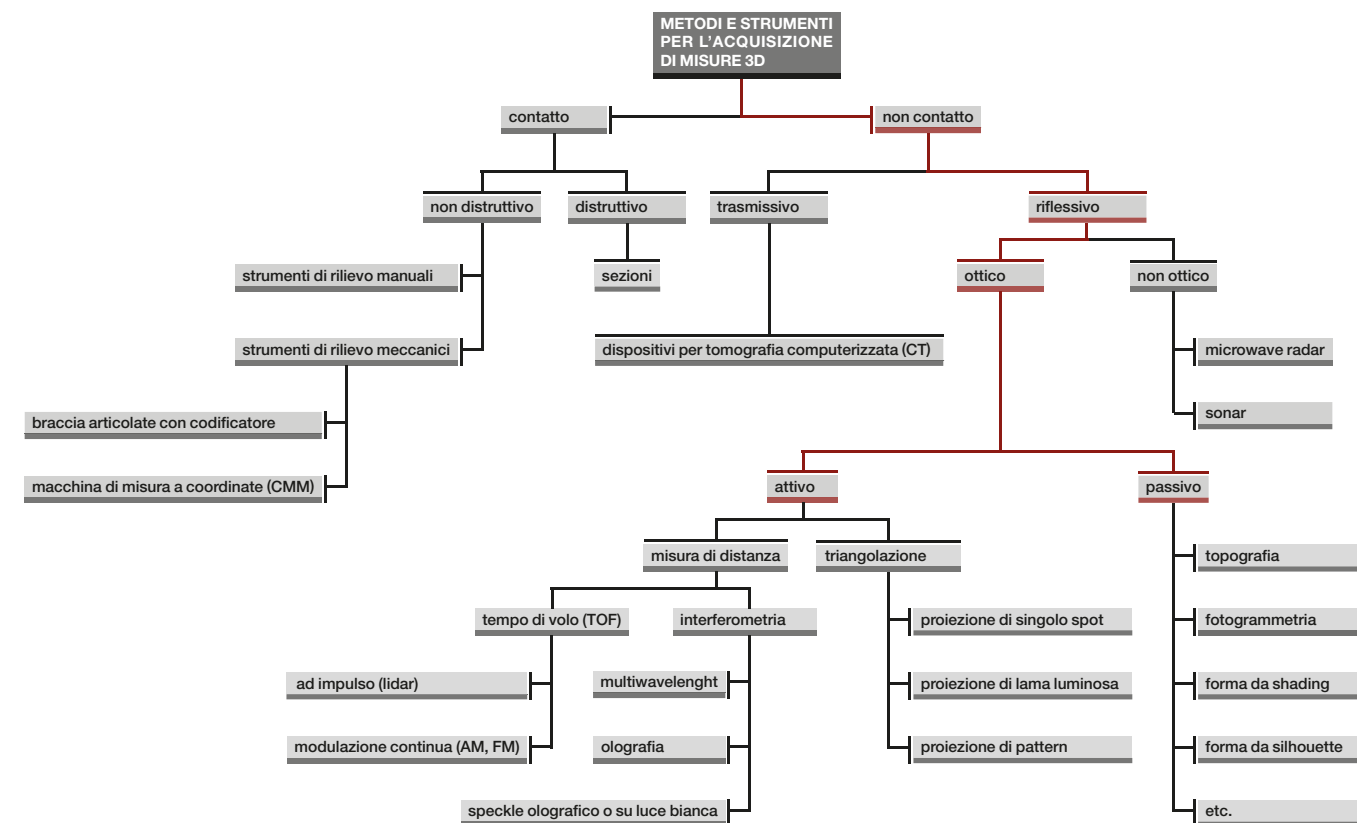
Fig. 5 – (sopra) Classificazione delle tecniche 'geomatiche' per l'acquisizione dei dati 3D in base alle dimensioni ed alla complessità dell'oggetto e/o della scena da ricostruire.

Fig. 6 – (nella pagina a fianco) Classificazione dei metodi e degli strumenti per l'acquisizione 3D in base al principio. Sono evidenziate le tecniche ottiche di misura 3D.

di questi può essere applicato in modo indifferenziato a qualsiasi tipo di registrazione.

'Ancora insostituibile risulta l'intervento dell'operatore nelle diverse fasi di acquisizione, fasi che vanno dalla scelta del dispositivo al suo corretto posizionamento, dall'input dei dati grezzi, alla ricostruzione del modello digitale completo, alla sua manipolazione per renderlo compatibile con le applicazioni di riferimento'¹¹.

L'idoneità con cui si possono acquisire grandi quantità di dati spaziali – già in forma 3D – in modo veloce e rigoroso, ricostruendo coerentemente le caratteristiche di posizione, forma e colore degli 'organismi' rilevati, non potrà certo prescindere dalla conoscenza e dalla capacità operativa del rilevatore nei confronti sia delle varie tecniche che dei singoli strumenti di rilievo adoperati. Essa sarà inoltre influenzata dalle caratteristiche dell'oggetto da acquisire, la sua complessità di forma, il



suo status superficiale e materico (riflettività, trasparenza, deformabilità, etc.), la sua dimensione spaziale, etc.; dalle contingenze del sito e dell'ambiente di lavoro (accessibilità, distanze di scansione, etc.); dalla compatibilità con il budget di progetto disponibile; ma soprattutto dalle finalità del modello finale – da cui se ne deducono l'accuratezza ed il dettaglio geometrico richiesti – e, quindi, dallo stesso scopo del rilevamento. Così 'identificare il migliore approccio possibile – come dice Fabio Remondino – è la prima fase per riuscire ad ottenere gli obiettivi prefissati'¹².

Nel contesto architettonico ed archeologico, in particolare, l'esigenza dell'operazione di misura, volta agli aspetti conservativi dei beni, richiede che il rilievo sia davvero uno strumento basato sulla modellazione tridimensionale dello stato di fatto, ottenuta attraverso quelle tecniche 3D – definite *reality-based*¹³ – che sono in gra-

do di restituire la realtà come si presenta al momento della registrazione.

Infatti, oggi, la generazione di modelli 3D digitali avviene principalmente attraverso quei metodi 'senza contatto' che misurano i manufatti architettonici o archeologici utilizzando 'la luce riflessa dalle superfici oggetto di rilievo, per esaminare le stesse superfici ed acquisirne informazioni sia metriche che cromatiche'¹⁴. Di seguito, è proprio grazie ad un 'approccio ottico'¹⁵ che alcuni di questi metodi di misura riescono a sfruttare la radiazione luminosa riflessa per trarne i dati caratteristici dei manufatti, 'operando in modo non invasivo e senza contatto 'fisico' con il misurato'¹⁶.

L'impiego di tali tecniche, pertanto, permette di ottenere misurazioni precise ed accurate attraverso un'automatizzazione del processo di acquisizione dei dati, da un lato, ed un campionamento delle superfici con una velocità ed

una risoluzione geometrica, senza paragoni rispetto ad altri strumenti, dall'altro¹⁷. Tuttavia, in base a questo processo di acquisizione dei dati 'ottico', ogni passaggio presenta varie possibilità le quali, a seconda del tipo di luce sfruttata, si basano su sistemi di acquisizione passivi – *image-based modeling* (IBM) – che utilizzano la luce presente nell'ambiente (naturale o artificiale); oppure su sistemi attivi – *range-based modeling* (RBM) – che usano, invece, il segnale elettromagnetico (dalle caratteristiche note) emesso

e poi registrato dallo strumento al fine di ricavarne una misura di distanza (*range*). Classificazione che, fatta sui diversi principi e caratteristiche di funzionamento, distingue, di conseguenza, le differenti modalità con cui si acquisiscono le coordinate spaziali degli oggetti rilevati e, quindi, delle loro superfici. Mentre i sistemi *image-based* – tecnica fotogrammetrica, teodoliti, etc. – ricavano le posizioni delle superfici dalle informazioni contenute in immagini di intensità, estraendone i relativi dati geometrici e cromatici; i siste-

rilievo archeologico archaeological survey	oggetti da rilevare in 3D objects to be recorded in 3D	dati e tecniche di rilievo available data and sources
scala regionale regional scale	territorio landscape topografia topography sito sites	→ immagini satellitari satellite images → immagini aeree a piccola scala small scale aerial imagery → Radar & LiDAR → GPS
scala locale local scale	sito sites architettura architecture strati di scavo excavation layers	→ immagini satellitari ad alta risoluzione high resolution satellite images → immagini aeree a grande scala large scale aerial imagery → Radar & LiDAR → scanner laser a tempo di volo (TOF-CW) terrestrial range data - time of flight → immagini terrestri terrestrial images → stazione totale total station → GPS
scala oggetto object scale	ritrovamenti excavated artefacts oggetti objects	→ immagini terrestri terrestrial images → scanner laser a triangolazione terrestrial range data - triangulation → sistemi a luce strutturata structured-light 3D scanner

Fig. 7 – Scale archeologiche di lavoro e possibili dati o tecniche per il rilievo 3D digitale e non invasivo.

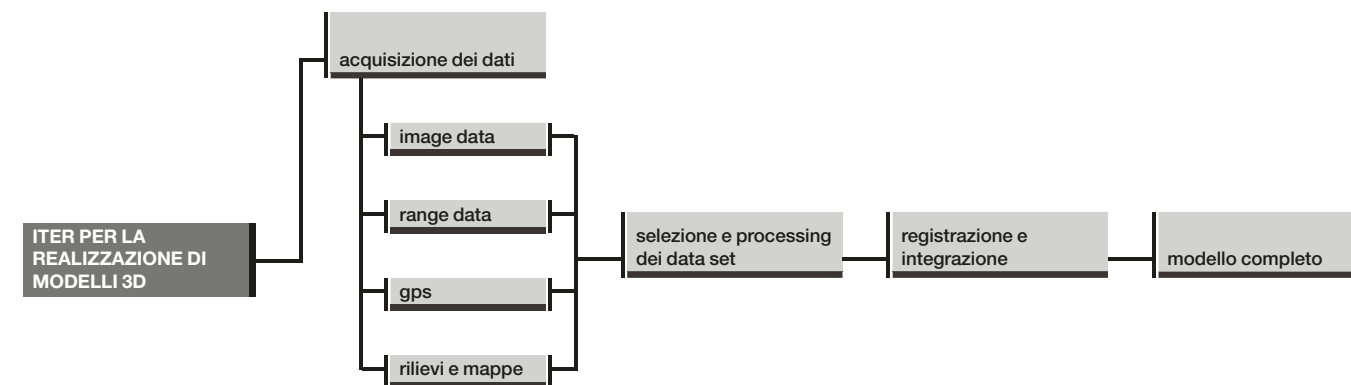


Fig. 8 – Procedura per la realizzazione di modelli 3D da dati rilevati.

mi *range-based* di visione 3D – *laser scanner*, strumenti a proiezione di luce strutturata, radar, etc. – ottengono direttamente le loro coordinate misurandole da informazioni esterne, a volte, accoppiandole anche a quelle colorimetriche.

Il successo registrato nel settore da queste tecniche di rilievo basate su sensori – ormai in uso da quasi vent'anni – oltre ad essere accompagnato dallo sviluppo di sistemi di visualizzazione sempre più performanti per la visualizzazione dei dati digitali – è stato determinato da una crescente varietà di richieste d'impiego, in seguito all'esigenza di forme di registrazione ed archiviazione digitale dei Beni, a differenti livelli di scala e risoluzione. La necessità, infatti, di restituire modelli 3D, a partire dalla scena reale osservata, in grado di soddisfare requisiti sempre più evoluti – anche in termini di accuratezza, obiettività e rapidità nella fase di acquisizione – ha spinto la comunità scientifica verso un ampio spettro di esperienze in cui implementare le tecniche di misura ottiche, al fine di poterne definire una linea metodologica chiara nella loro applicazione. Sviluppare metodi di multi-risoluzione e multi-sensore, alla ricerca di migliorare le capacità degli strumenti e poter rilevare al meglio le complesse informazioni geometriche e materiche presenti nei manufatti, ha condotto, altresì, ad un uso sempre più consapevole ed appropriato dei singoli strumenti¹⁸. La conoscenza del livello di complementarità delle loro caratteristiche intrinseche, infatti, permette di

restituire risultati più completi, decisamente migliori in termini assoluti, e capaci di adattarsi alle singole esigenze morfologiche dei diversi oggetti contenuti nella scena rilevata, dalle applicazioni territoriali a quelle architettoniche, fino al rilievo tridimensionale di oggetti di piccole dimensioni¹⁹. Così, spesso, l'uso indipendente o integrato di entrambi i sistemi di misura ottici – attivi e passivi – se da un lato ottimizza il processo di acquisizione e modellazione, sfruttando al meglio le prestazioni di ciascuna tecnica e sopperendo ad eventuali limiti, dall'altro aumenta notevolmente la facilità con cui acquisire i dati formali sia di singoli manufatti che di siti molto estesi e complessi.

Soprattutto in campo archeologico – dove le premesse d'introduzione alle finalità documentative e conservative del patrimonio ne descrivono la rilevanza – si comprende l'importanza fondamentale esercitata dall'impiego dei sensori ottici come pratiche di lavoro multiscala, e dal consolidamento di una relativa *pipeline* del processo di applicazione per creare modelli 3D *reality-based* che presenti passaggi ben definiti dall'acquisizione, registrazione e integrazione dei dati fino alla loro modellazione e visualizzazione.

‘Oggi esiste una linea metodologica chiaramente definita, lungo la quale [...] l'implementazione di tecniche di fotogrammetria e sensori attivi ha raggiunto i caratteri di un sistema maturo e stabile’²⁰.

Note

1. Paleontologia, preistorica, protostorica, classica, cristiana e medioevale, islamica, post-medioevale e industriale, orientale (egittologia, del Vicino Oriente, del Medio Oriente, dell'Estremo Oriente), dell'Africa, delle Americhe, dell'Oceania.
2. Fra questi l'archeologia subacquea, l'archeologia dell'architettura, l'archeologia della produzione, o come l'etnoarcheologia.
3. Cfr. M. Docci, D. Maestri, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, ed. Laterza, 2009, p. 3.
4. Cfr. D. Manacorda, *Lezioni di Archeologia*, ed. Laterza, Bari, 2008, p. 29.
5. Cfr. M. Docci, D. Maestri, *Manuale di rilevamento...*, op.cit., p. 12.
6. La stratigrafia è la scienza che descrive gli strati archeologici. In particolare per ricostruire la storia degli strati sono oggetto di analisi: forma, concatenamento, divisione e successione. Le basi di questa scienza furono gettate da Niccolò Stenone (Copenaghen, 1638 – Schwerin, 1686) nel XVII secolo, il quale dimostrò che gli strati geologici si sovrapponevano nel tempo e che quelli più antichi erano i più profondi. Fondamentale fu anche il contributo di William Smith (XIX secolo), che sottolineò l'importanza dei fossili per distinguere adeguatamente gli strati.
7. Il fossato 'taglia' il terreno nel quale viene scavato, il muro 'riempie' la sua fossa di fondazione, l'accumulo di immondizia 'copre' la pavimentazione della strada e 'si appoggia' al muro contro il quale è stato gettato, ecc. In senso inverso il terreno 'è tagliato' dal fossato, la fossa di fondazione 'è riempita', la pavimentazione della strada 'è coperta' dall'immondizia e infine rispetto al muro l'immondizia 'gli si appoggia'. Ciascuna di queste relazioni fisiche indica un rapporto cronologico: se il fossato taglia il terreno vuol dire che l'azione di scavare il fossato non può che essere avvenuta dopo l'evento di deposito del terreno in cui viene scavato.
8. Il 'matrix di Harris' (conosciuto anche come 'diagramma stratigrafico' o più semplicemente 'matrix') è uno schema utilizzato per definire la successione temporale dei contesti archeologici e la loro sequenza di deposizione in un sito archeologico, la cosiddetta 'stratigrafia'. Il sistema fu inventato nel 1973 a Winchester dall'archeologo Edward C. Harris (Hamilton, 1946).

9. Il sistema Munsell dei colori, o più semplicemente sistema Munsell, è uno spazio dei colori usato come standard internazionale per definire i colori in base a tre coordinate dimensionali: tonalità (Hue), luminosità (Value o Lightness) e saturazione (Chroma). Venne creato da Albert Henry Munsell (Boston, 1858 – Brookline, 1918) all'inizio del XX secolo e adottato negli anni trenta dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti d'America come sistema di colori ufficiale per le ricerche sul suolo.

10. Ovvero della 'Geomatica'. Con l'uso di questo neologismo 'Geomatics' – da geo 'terra' e matics 'informatica' – creato agli inizi degli anni '80 nell'Università di Laval in Canada, si intende raggruppare ed includere tutti gli approcci di rilevamento territoriale ed ambientale evidenziando l'aspetto determinante che in essi riveste l'informatica (Cfr. M.A. Gomarasca, *Basics of Geomatics*, ed. Springer Science & Business Media, 2009, pp. 1-2). Essendo così quella scienza di raccolta (con alcuni strumenti), di trattamento (con alcune tecniche), di analisi e di interpretazione dei dati relativi alla superficie terrestre, la Geomatica per i Beni Culturali utilizza tecniche e pratiche di registrazione della scena e di modellazione digitale, possibilmente in tre dimensioni, per le successive analisi ed interpretazioni dei dati spazialmente correlati acquisiti (Cfr. F. Remondino, *Geomatics and cultural heritage*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), '3D Recording and Modelling in Archaeology...', op. cit., p. 13).

11. C. Montani, C. Rocchini, R. Scopigno, *Tecnologie 3d Scanning. Introduzione e Valutazione Comparativa*, C.N.R. Pisa, Pisa, 2001, p. 2.

12. F. Remondino, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architettura complesse*, in E. Ippoliti, A. Meschini (a cura di), 'Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale', DISEGNARECON, vol. 4, n. 8, Roma, 2011, pp. 90-98.

13. 'che rilevano e restituiscono in 3D, attraverso sensori attivi o passivi, la realtà così come la vediamo' (Cfr. F.I. Apollonio, M. Gaiani, F. Remondino, *Una pipeline per l'acquisizione di dati 3D*, op. cit., p. 41).

14. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 436.

15. Ovvero un approccio 'in cui le informazioni sulla forma sono in qualche modo derivate dal modo in cui l'oggetto stesso si manifesta visivamente o dal modo in cui riflette la luce incidente' (Cfr. C. Montani, C. Rocchini, R. Scopigno, *Tecnologie 3d Scanning*, op. cit., p. 5).

16. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 466.

17. Cfr. Ivi.

18. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in AA.VV., 'Archeologia e Calcolatori', n. XII, ed. All'Insegna del Giglio, 2011, p.169.

19. Cfr. F. Remondino, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architettura complesse*, op. cit., p. 97.

20. F.I. Apollonio, M. Gaiani, F. Remondino, *Una pipeline per l'acquisizione di dati 3D*, op. cit., p. 42.



Fig. XIII – Nelle pagine precedenti, particolare della Stele di Vicchio, ove sono riconoscibili alcuni grafemi della lingua etrusca. In primo piano uno dei targets circolari impiegati per il rilievo tridimensionale.

3. Sistemi di acquisizione image-based: l'approccio fotogrammetrico

I sensori passivi forniscono, analogamente alle immagini registrate dalle macchine fotografiche digitali, dati bidimensionali che debbono essere poi trasformati in coordinate metriche tridimensionali per produrre dei modelli digitali. Affinché tale operazione sia possibile, generalmente, sono necessarie almeno due immagini¹ e i dati 3D possono essere ricavati usando le formule della prospettiva e della geometria proiettiva come base analitica. La più nota ed importante tecnica di *image-based* che consente di ricavare con precisione ed accuratezza informazioni metriche e semantiche – come forma, dimensione e posizione – da fotografie, è la fotogrammetria².

Il metodo fotogrammetrico, infatti, impiegando un minimo di due immagini fotografiche della stessa scena statica o di un oggetto acquisito da punti di vista differenti, ne ricostruisce i dati geometrici e metrici reali, poiché sfrutta il comune fondamento ottico della prospettiva e quindi della visione umana³. In effetti, qualora un osservatore esamini con entrambi gli occhi un dettaglio di un oggetto, sulla fovea di ciascuno di essi si formano – come dice Cesare Cundari – ‘due immagini sensibilmente identiche’⁴ mentre il cervello ne recepisce una sola. Tale percezione ‘unica’ consente di risolvere, del resto anche in fotogrammetria, il problema dell'identificazione dei raggi omologhi di due fasci prospettici; sono così corrispondenti due raggi che concorrono in due ‘punti fusi dall'osservatore’⁵.

Perciò la visione fotogrammetrica non è monoscopica, ma risulta dunque stereoscopica, ovvero tridimensionale: essa consente un'esplorazione realistica del modello ed una sua lettura metrica, a partire dalle fotografie, ed usa la geometria proiettiva per farlo. Ragione per cui, considerando questo tipo di registrazione visiva, il sistema di rilevamento fotogrammetrico eseguito tramite coppie di prese fotografiche viene appunto definito ‘stereoscopico’.

3.1 Storia della fotogrammetria

La nascita della fotogrammetria, intesa come ‘l'insieme delle teorie geometriche e dei procedimenti ottico-meccanici che studiano e risolvono il problema di ricostruire un oggetto a due o tre dimensioni di cui siano date prospettive o fotografie’, viene fatta risalire alla fine del XIX secolo, in concomitanza con l'invenzione della fotografia, ma in realtà si fonda su importanti studi teorici precedenti. Trattandosi, infatti, di un problema proiettivo è naturale pensare a tutti gli studi di proiezione centrale che hanno preceduto di molti secoli la fotografia.

In altri termini possiamo affermare che le origini della fotogrammetria sono comuni a quelle della prospettiva, cioè al momento in cui si prese coscienza del rapporto diretto fra realtà e sua rappresentazione⁶.

Del resto è già possibile rintracciare alcuni precursori della fotogrammetria a partire da Aristotele⁷, il quale per primo fece riferimento al processo di proiezione ottica di immagini (350 a.C. ca.), e Al-Hazen al-Basri⁸, che nell'XI secolo descrisse la prima camera oscura. Tuttavia senza il contributo fornito dal Brunelleschi e dall'Alberti⁹ all'invenzione dei metodi di costruzione grafica della prospettiva; senza i traguardi raggiunti da Leonardo Da Vinci¹⁰ in campo ottico, geometrico e meccanico, e da Albrecht Dürer¹¹ nella fabbricazione di dispositivi proiettivi, matematici e strumentali per rendere veri i disegni prospettici, non sarebbero mai stati possibili i progressi successivi, fondamentali per le operazioni fotogrammetriche. In particolare, ciò che Dürer aveva concepito prima ancora che la fotografia fosse conosciuta, mediante un lavoro teorico sulle proprietà geometriche dei punti di vista, fu un apparecchio per disegnare, ossia un telaio verticale contenente due serie ortogonali di fili tesi, grazie al quale si poteva diminuire la complessità del disegno basandosi su una visione centrale monoculare. In questo dispositivo, l'occhio dell'artista – centro della prospettiva – veniva fissato,

mediante un mirino, ad una distanza adeguata dal piano di disegno, rappresentato appunto da un telaio entro cui era 'racchiuso' un quadro semitrasparente. Il foglio su cui l'artista disegnava ne riproduceva la quadrettatura ed in tal modo permetteva una corretta, benché empirica, rappresentazione prospettica¹².



Fig. 9 – Ultima versione dello strumento per disegnare presentato da Dürer. L'occhio del pittore su un mirino traguarda il modello – una donna sdraiata sul medesimo tavolo dove egli disegna – attraverso un telaio prospettico con fili tesi (A. Dürer, *Ueber die Kunst der Messung*, Norimberga 1525).

Sebbene i principi della fotogrammetria abbiano le loro origini nell'antichità, legandosi alla storia della rappresentazione – ed in particolare alla formulazione della *perspectiva*¹³ – per la parte teorica, all'ottica ed alla fotografia per quella applicativa, essa è vincolata alle relative scoperte tecnologiche¹⁴.

Ecco, dunque, che il periodo rinascimentale è un importante riferimento in merito, e proprio Filippo Brunelleschi¹⁵ con le sue tavolette prospettiche può a ragione essere considerato un ricercatore non solo in ambito della prospettiva, ma anche della fotogrammetria. La sperimentazione brunelleschiana è stata messa in rapporto con la camera oscura da Mario Fondelli¹⁶, che sottolinea come il Brunelleschi avesse intuito alcuni concetti fondamentali della fotogrammetria moderna, tanto da poter essere considerato 'inventore' delle tecniche fotogrammetriche¹⁷.

Agli inizi del Cinquecento il fiorentino Cosimo Bartoli¹⁸, nella sua opera¹⁹, descrive accuratamente i metodi di misurazione indiretta degli oggetti relativamente all'architettura civile e militare, al territorio e alle vedute prospettiche 'ad uso specialmente degli uomini d'arme', servendosi di

considerazioni di natura proiettiva.

D'altra parte la materia prospettica trova una sua sistemazione solo 190 anni dopo le geniali intuizioni brunelleschiane e 125 anni dopo la prima organizzazione compiuta da Piero della Francesca, nonché due secoli prima della codificazione operata da Gaspard Monge²⁰, grazie agli studi del matematico pesarese Guidobaldo del Monte²¹. Il suo trattato di prospettiva, infatti, contiene talmente importanti ragionamenti che quest'ultimo può essere considerato un caposaldo per lo sviluppo successivo della disciplina. In breve possiamo ricordare come nel primo libro del suo trattato²², Guidobaldo dimostri scientificamente l'esistenza dei punti di fuga, oltre a definire nell'immagine prospettica la convergenza di fasci di rette parallele, pensando ad un loro punto comune situato all'infinito. Studi importanti con risultati assolutamente non scontati per l'epoca.

Guidobaldo, inoltre, utilizza il ribaltamento del quadro sul piano orizzontale, anticipando così uno dei fondamenti del principio omologico che governa anche i moderni software di raddrizzamento delle immagini. Affronta anche il ragionamento inverso studiando la ricostruzione geometrica di punti dei quali è nota l'immagine prospettica. Il problema della restituzione geometrica della prospettiva e delle condizioni che lo rendono possibile viene discusso in forma rigorosa da Simon Stevin²³, la sua trattazione²⁴ può essere considerata come il preludio alla moderna fotogrammetria, anche se affronta e risolve soltanto alcuni casi particolari.

Successivamente si occupano dell'argomento altri matematici fra i quali Vaulezard²⁵, Desargues²⁶ e Lambert²⁷. Proprio quest'ultimo può essere annoverato fra i maggiori precursori della fotogrammetria, infatti il suo trattato '*Die Freye Perspectiv*' del 1759 esamina il 'problema prospettico inverso' (*inverse central perspective*), analizzando gli elementi di riferimento occorrenti per risalire da un'immagine prospettica alle caratteristiche (forma e dimensioni) dell'oggetto reale, ed il concetto della resezione spaziale (*space resection*) di immagini coniugate.

Partendo dai già noti principi di raggio visivo e linea di fuga, sviluppa le regole della geometria proiettiva per determinare la posizione dell'osservatore e trovare la linea dell'orizzonte, stimando l'orientamento degli oggetti contenuti in un quadro. Lambert ha avuto il merito di capire il valore dei punti di fuga quale supporto geometrico nel pro-

cesso inverso della prospettiva. Inoltre è stato l'inventore di quella che oggi viene chiamata, in visione computazionale e in fotogrammetria, la 'calibrazione della camera', aprendo così il cammino al connubio fra la geometria proiettiva e quella analitica, che unisce l'approccio puramente geometrico con il metodo delle coordinate.

La geometria proiettiva, studiata da matematici come Pascal²⁸ o Desargues nel corso del XVII secolo e formalizzata chiaramente dal trattato di Poncelet²⁹ nel 1822, enuncia le nozioni intuitive di prospettiva e studia le proprietà delle figure invariate per proiezione.

Più tardi Felix Klein³⁰ chiarirà il legame tra 'geometria proiettiva' e 'geometria euclidea': la prima di queste, infatti, 'è nata quando si è cominciato a considerare come identiche la figura primitiva e tutte quelle da essa deducibili per proiezione e ad enunciare le proprietà proiettive in modo da mettere in evidenza la loro indipendenza nei confronti delle modificazioni apportate dalla proiezione'³¹.

Nel 1600 l'astronomo Giovanni Keplero³² fornisce una precisa definizione della stereoscopia³³, mentre, per quanto riguarda gli apporti matematici sull'argomento, John Napier³⁴ inventore, teologo e matematico scozzese, pubblicava le tabelle degli algoritmi (*tables of logarithms*) e Blaise Pascal, dopo avere scritto a soli sedici anni un trattato di geometria proiettiva, stabiliva il concetto di metrologia (*metrology*) e consegnava al mondo una calcolatrice da tavolo (*desk calculator*). Isaac Newton³⁵ e Gottfried von Leibniz³⁶ stabilirono con sicurezza i concetti di differenziale e calcolo integrale (*calculus*).

L'esercizio pratico della fotogrammetria iniziò solo dopo che Arago³⁷ e Niépce³⁸ annunciarono il 'processo eliografico', in base al quale Louis J.M. Daguerre³⁹ (1789-1851) presentò, nel 1837, all'Accademia Francese delle Arti e delle Scienze le fotografie (*photographs*) definite 'dagherrotipi'. Sul finire del XIX secolo, in seguito all'invenzione della fotografia, la fotogrammetria si sviluppò in un ambito più ristretto, quello del rilievo topografico del terreno, tanto che il termine 'fotogrammetria' venne usato per il rilevamento planimetrico ed altimetrico del territorio (rilievo aerofotogrammetrico) e, con le stesse caratteristiche, esteso al rilievo di monumenti.

Del resto la nascita della complessa tecnica fotogrammetrica, basata su componenti radicati nella matematica, nelle tecniche di produzione ed elaborazione delle immagini,

nelle operazioni di rilievo e mappatura, quale parte della disciplina geodetica più generale, risale solo a metà del XIX secolo per opera di Aimé Laussedat⁴⁰. Infatti l'impiego delle immagini fotografiche come mezzo di registrazione e ricostruzione dello spazio naturale ha dovuto attendere, per essere applicato correttamente, che si fossero sviluppate le conoscenze in ambito teorico e le strumentazioni necessarie affinché si potessero ricavare informazioni metriche dalle fotografie.

Laussedat immagina di utilizzare le prospettive disegnate come base da cui partire per ricostruire i fasci prospettici formati dall'insieme di raggi visivi che convergono verso l'occhio dell'osservatore. Utilizzando la camera chiara di Wollaston⁴¹ che permette, tramite un prisma, di sovrapporre otticamente l'immagine da ritrarre sulla superficie ove si sta disegnando. In tal modo si possono vedere contemporaneamente sia la scena che la superficie del disegno come in una doppia esposizione fotografica. Questo consente di trasferire i punti chiave dalla scena alla superficie del disegno, cosa di grande aiuto per un'accurata resa prospettica; inoltre si possono anche tracciare facilmente i contorni degli oggetti nella scena.

Dunque, tramite la 'camera chiara' è possibile ottenere la registrazione fotografica delle prospettive. In tal modo Laussedat, che chiama il suo metodo 'metrografia', fu il primo a individuare le potenzialità della fotografia per l'estrazione d'informazioni a carattere spaziale decretando così la nascita della 'fotogrammetria'.

Le ricerche sperimentali e tecniche si appoggiano ovviamente a studi teorici molto importanti, dato che il problema fondamentale della fotogrammetria è appunto un problema di geometria descrittiva. Si potrebbero ricordare a questo proposito tutti i matematici che contribuirono allo sviluppo del metodo della 'proiezione centrale' e di quello della 'bicentrale' o 'stereoscopica', ma per non eccedere, basta fare i nomi di due studiosi, in particolare, che si dedicarono al problema fotogrammetrico propriamente detto: Guido Hauck⁴² che stabilì il rapporto tra la geometria proiettiva (*projective geometry*) e la fotogrammetria, partendo dalla convinzione che essa deve essere considerata come il concetto geometrico fondamentale e come la base dei maggiori sviluppi classici della fotogrammetria analitica. Il secondo, Sebastian Finsterwalder⁴³, in una serie di pubblicazioni, dal 1899 al 1937, stabilì una solida base per

la fotogrammetria analitica, fornendo le relazioni geometriche che disciplinano la *space resection* e l'intersezione oltre che gli orientamenti relativi ed assoluti. Predisse la possibilità futura della triangolazione del punto nadir e l'applicazione di fotogrammetria per le misure astrogeodetiche. Inoltre formulò le leggi alla base della propagazione dell'errore (*error propagation*) nelle triangolazioni a lunga striscia e, probabilmente, fu la prima persona ad usare la terminologia vettoriale (*vector terminology*) nel linguaggio della fotogrammetria.

L'idea fondamentale proposta da questa nuova disciplina, i cui aspetti algebrici saranno formalizzati dal matematico A. Kruppa (1913), ed il concetto essenziale della stereoscopia binoculare, cioè il fatto che due immagini di una scena prese da punti leggermente diversi contengono informazioni sufficienti ad ottenere una ricostruzione tridimensionale, vennero sfruttati nel campo della fotogrammetria. Kruppa dimostrò che, date due viste di cinque punti distinti, è possibile ricostruire la rotazione e la traslazione tra le posizioni delle due telecamere oltre alla profondità della scena (a meno di un fattore di scala). Infatti su una fotografia, la scena tridimensionale è proiettata in prospettiva su di un piano a due dimensioni. Di conseguenza un qualsiasi punto dell'oggetto fotografato, indipendentemente dalla sua posizione nello spazio, sarà semplice e comunque posizionato lungo il raggio che partendo dal centro ottico della macchina fotografica si prolunga all'infinito. Tuttavia, se lo stesso oggetto è visibile su due fotografie distinte, questo punto si troverà allora sull'intersezione dei due raggi corrispondenti. Questo procedimento – conosciuto con il nome di 'triangolazione' – permette, a partire da due foto (di posizione e orientamento relativi conosciuti), di ritrovare un qualsiasi punto nello spazio a condizione che questo sia presente in entrambe le fotografie.

Benché la geometria della stereoscopia sia stata compresa per molto tempo, il problema della corrispondenza in fotogrammetria è stato sempre risolto da esseri umani, stabilendo a mano le coppie di punti corrispondenti.

Negli anni Settanta ed Ottanta sono stati dedicati molti sforzi alla soluzione del problema della corrispondenza tra punti, sia nel campo della visione artificiale che in quello della fotogrammetria. Alle ricerche di fotogrammetria teorica portarono notevoli contributi alcuni geometri italiani, in particolare G. Loria⁴⁴, F. Severi⁴⁵, A. Comessatti⁴⁶.

Parallelamente agli studi teorici si svilupparono le invenzioni di strumenti ottici adeguati, già nel 1838 Charles Wheatstone⁴⁷ ideò lo stereoscopio, il più importante usato in fotogrammetria, per visualizzare immagini tridimensionali.

Nel 1871 Ernst Abbé⁴⁸, co-fondatore della German Zeiss Works, l'azienda di ottica di precisione fondata a metà 1800 da Carl Zeiss iniziò gli intensi studi e le applicazioni degli elementi ottici (*optical elements*) sulla base di rigorose analisi matematiche (*mathematical analyses*). Pochi anni dopo, nel 1892, Franz Stolze⁴⁹ fotografo e stenografo tedesco, scoprì il principio del marcatore galleggiante (*floating mark*).

All'inizio del 1900, lo sviluppo del principio di misurazione stereoscopica, esaminato da Carl Pulfrich⁵⁰, anche lui del gruppo Zeiss, sviluppò un metodo possibile per misurare e ricavare le dimensioni spaziali (*spatial dimensions*) dalle immagini stereo-fotografiche con marcatori galleggianti, permettendo l'automazione del processo di misurazione delle dimensioni spaziali da stereofotografie ('fotogrammetria stereo analogica') attraverso l'uso di floating marks; nel 1901, presentò lo 'Zeiss Pulfrich Stereocomparator' completando il primo prototipo 'Stereoautograph' di Eduard von Orel alla 73^a Conferenza degli Scienziati e Medici tenuta ad Amburgo. Nel medesimo anno, ma indipendentemente, Henry G. Fourcade⁵¹ inventò in Sud Africa uno stereocomparatore simile, che fu presentato alla Philosophical Society di Città del Capo.

Negli stessi anni l'austriaco Eduard Dolezal⁵², una valida guida internazionale in campo fotogrammetrico, divenne Presidente fondatore della *International Society for Photogrammetry* (1909) e creò anche l'*International Archives* di fotogrammetria.

Nel 1855 Kersten coniò il termine 'photogrammetry/fotogrammetria' e pochi anni dopo Albrecht Meydenbauer⁵³ ebbe l'idea di utilizzare la fotogrammetria nella documentazione del patrimonio culturale architettonico. Sperimentò tecniche e strumenti per il rilievo fotogrammetrico con l'intento, attualissimo, di realizzare un archivio fotografico/fotogrammetrico del patrimonio monumentale ed architettonico germanico, affinché i più importanti monumenti potessero rimanere 'virtualmente' conservati in modo da essere ricostruiti in caso di distruzione. Purtroppo non incontrò l'approvazione del governo prussiano, ma re-

sta innegabile il fatto che fu il primo ad intuire le potenzialità del rilievo fotogrammetrico come strumento utile alla preservazione del patrimonio culturale.

Tutto ciò, unitamente al primo libro di testo tedesco sulla fotogrammetria di Koppe⁵⁴ (1889) ed al lavoro classico sulla fotogrammetria francese di Aimé Laussedat (1898) che utilizza prospettive fotografiche anche per compilare mappe topografiche, rappresentano alcune delle pietre miliari della fotogrammetria analitica.⁵⁵

Nel campo dell'applicazione della fotografia alla topografia fu proprio l'Italia che diede i maggiori risultati, infatti già nel 1855 Porro⁵⁶ pensò di utilizzare due fotografie eseguite dalle estremità di una base nota per ricostruire planimetria ed altimetria del terreno. Negli anni seguenti realizzò la sua idea costruendo appositamente degli strumenti rivelatisi, purtroppo, d'impiego non attuabile praticamente.

Nel 1878 Paganini⁵⁷ collegò la camera fotografica al teodolite riuscendo così a stabilirne la posizione assoluta nello spazio al momento della presa. Veniva però esplorato un solo fotogramma alla volta e grande era la difficoltà per individuare i punti omologhi sui due fotogrammi isolatamente considerati, oltre a richiedersi una lunga serie di calcoli e procedimenti grafici.

La prima applicazione pratica della visione stereoscopica in fotogrammetria è quella realizzata nello 'stereocomparatore di Pulfrich', costruito nelle officine Karl Zeiss di Jena nel 1901, determinando l'inizio della fotogrammetria analitica.

Ma il vero progresso si manifesta pochi anni dopo quando l'austriaco Eduard Von Orel⁵⁸ costruisce il primo 'restitutore'⁵⁹ analogico che permette di determinare la dimensione e la forma di un oggetto fotografato due volte. Grazie all'osservazione stereoscopica di due fotografie, questo apparecchio consente di misurare, direttamente nello spazio, la posizione di un punto di riferimento. Von Orel, infatti, collegando allo stereocomparatore alcune alidade⁶⁰ - le quali, nello stesso tempo in cui l'operatore esegue il puntamento stereoscopico, eseguono l'intersezione grafica e la determinazione del dislivello del punto - realizza nel 1908 il suo 'stereoautografo', cioè il primo apparecchio di restituzione fotogrammetrica pratico.

In conclusione dai primi tentativi di Laussedat e dalle intuizioni del Porro, poi dalle applicazioni all'architettura di

Meydenbauer, decine di studiosi tentarono di risolvere il problema della trasformazione proiettiva, da prospettiva centrale quale si poteva ritenere l'immagine fotografica, a proiezione ortogonale, con accorgimenti che prescindessero dal calcolo numerico; sia per via grafica che con ausili ottico meccanici. Ma fu solo all'inizio del ventesimo secolo, con l'avvento della stereofotogrammetria, dopo la costruzione dello stereocomparatore di Pulfrich, che si intrvide la soluzione corretta del problema.

Dimostrata l'utilità pratica della fotogrammetria nella compilazione di mappe topografiche, anche grazie all'aiuto fornito dall'Aviazione, sviluppatasi in particolare negli anni della prima guerra mondiale, l'invenzione e la costruzione di restitutori stereoscopici si moltiplicò, seguendo tre direzioni: (1) strumenti 'a proiezione ottica' (principio seguito dall'industriale italiano Umberto Nistri⁶¹ ed altri), sui quali i fotogrammi vengono proiettati contemporaneamente ma con colori complementari (principio dell'anaglifo) oppure alternativamente (sistema a brillamento) e l'intersezione dei raggi omologhi viene osservata su un piccolo schermo mobile fornito di marca luminosa; (2) strumenti 'a proiezione mista ottico-meccanica', nei quali i raggi omologhi vengono ricostruiti per via ottica nello spazio immagine e mediante aste metalliche nello spazio oggetto; (3) strumenti 'a proiezione meccanica', nei quali i raggi omologhi sono materializzati da due aste metalliche imperniate in snodi cardanici che sostituiscono a tutti gli effetti l'obbiettivo fotografico.

Il 'padre' della 'proiezione meccanica' è stato Ermenegildo Santoni⁶² con il suo 'stereocartografo' costruito nelle officine dell'Istituto Geografico Militare nel 1924.

Questa eccezionale idea, di realizzare processi ottici complessi con mezzi meccanici, ha aperto la via maestra alla fotogrammetria: la maggior parte dei restitutori attuali - e la quasi totalità degli strumenti di maggior precisione - sono basati sulla proiezione meccanica delle visuali omologhe.

Durante il servizio come 'osservatore d'aereo' il Santoni prese coscienza dei problemi dell'Aereofotografia e della Fotogrammetria aerea, rendendosi conto della difficoltà di ricomporre l'assetto spaziale delle prese fotografiche fatte dall'aereo. Perfezionò, così, le camere aereofotografiche dei tempi con un *intervallometro automatico*, il cui prototipo venne messo in funzione nel 1917 in zona di guerra

e brevettato l'anno successivo. Infatti proprio durante la Prima Guerra Mondiale s'intuì l'importanza delle riprese fotografiche da terra, ma soprattutto dal cielo. In tal senso l'aerofotogrammetria fu davvero rivoluzionaria; nacque così una nuova branca dei metodi di rilevamento topografico. Santoni e Nistri, inoltre, contribuirono essenzialmente nella progettazione e realizzazione di strumenti di vario genere, come anche nello sviluppo dei numerosi concetti matematici corrispondenti. Quest'ultimo brevettò nel 1919 un metodo di aerotriangolazione spaziale, che tuttavia fu praticamente applicato per la prima volta all'uso degli apparecchi Multiplex intorno al 1923-33. Nel primo periodo, dalla fine del XIX agli inizi del XX secolo, la restituzione fotogrammetrica avveniva tramite una

singola immagine (*fotogrammetria a immagine singola*) che, opportunamente rettificata e restituita tridimensionalmente, consentiva la misura delle coordinate. In realtà questo procedimento era valido soltanto per superfici piane e solo per l'area delimitata dal fotogramma. Si otteneva così una semplice restituzione bidimensionale eseguita, peraltro, graficamente a mano da un operatore, un procedimento lungo e passibile di errori. Nel periodo successivo, grazie allo sviluppo di principi matematici ed alle invenzioni di componenti ottici, meccanici ed elettronici, che fornirono strumenti sempre più attinenti, l'utilizzo della fotogrammetria vide un forte incremento, in seguito all'avvento degli aeromobili, palloni aerostatici o dirigibili come lo Zeppelin, ed allo sviluppo

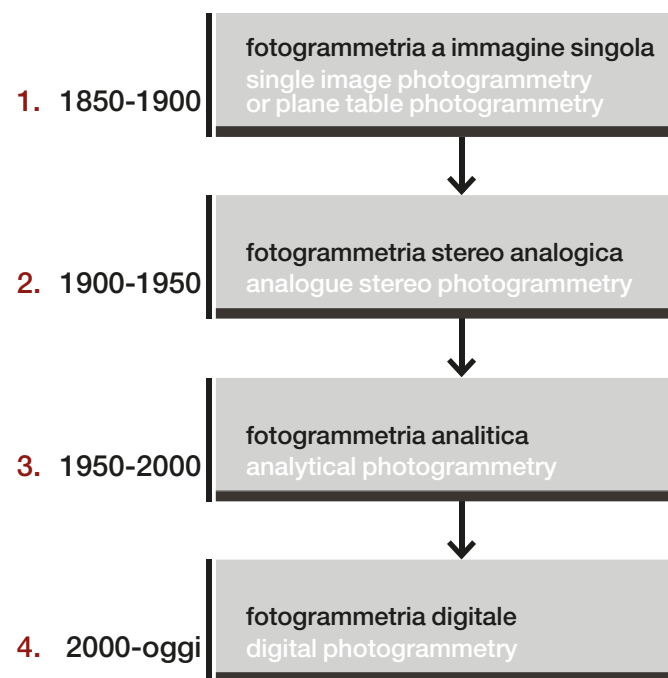
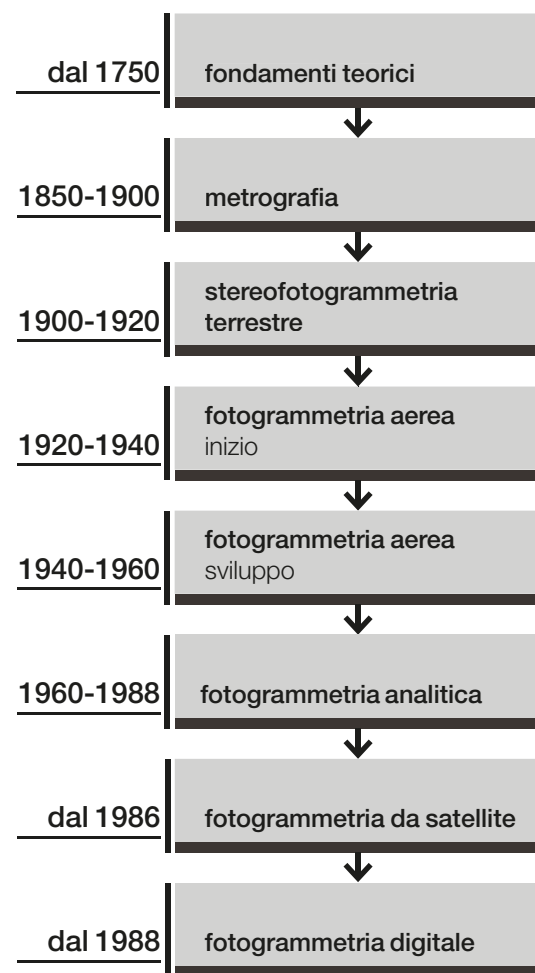


Fig. 10 – (a sinistra) I cicli fondamentali della fotogrammetria (Cfr. T. J. Blachut, R. Burkhardt, *Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments, ASPRS Science and Engineering, USA, 1991*).

Fig. 11 – (sopra) Per inquadrare meglio lo sviluppo della fotogrammetria appare utile fare riferimento alla suddivisione in quattro periodi proposta dal cecoslovacco Gottfried Konecny⁶³, uno dei massimi esperti in materia.

di nuovi strumenti, come la macchina fotografica per le prospezioni aeree studiata da Otto Messter nel 1915, nonché lo sviluppo di un metodo di calcolo per la restituzione di due immagini prese da palloni aerostatici di Sebastian Finsterwalder⁶⁴ all'inizio del secolo (1903). È questo il periodo della stereofotogrammetria terrestre (1900-1920) e dell'inizio della fotogrammetria aerea (1920-1940). Nel 1910, venne fondata a Vienna la Società internazionale di Fotogrammetria ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*). Il progresso del settore subì un arresto durante la Prima guerra mondiale, ma riprese subito dopo, anche per interessi militari, grazie agli enormi sviluppi delle basi matematiche e degli strumenti computazionali che finirono per costituire una solida base per la 'fotogrammetria analitica'.

Dopo la messa a punto, da parte dell'ingegnere austriaco Theodor Scheimpflug⁶⁵ - padre della fotogrammetria aerea - della tecnica di ripresa aerea, della tecnica per l'orientamento dei modelli, della tecnica del concatenamento per la formazione della strisciata e della tecnica del radrizzamento, nel 1920 Otto von Gruber⁶⁶, collaboratore di Pulfrich, osservò, nelle triangolazioni di una striscia, l'influenza di errori in dimensioni ed altezza. Sulla base di esperimenti vennero sottolineati due punti: l'utilità dei dati ausiliari e gli strumenti, al fine di evitare la propagazione di errori sistematici nella triangolazione di strisce, nonché il vantaggio pratico di utilizzare telecamere grandangolari. Sul tema della comprensione delle fonti e delle propagazioni dell'errore nella fototriangolazione è stato importante l'apporto dell'olandese Willem Schermerhorn⁶⁷ che ha dato il via ai test sistematici di aerotriangolazione. Nel 1921 Reinhard Hugershoff⁶⁸ professore all'università di Dresda, introdusse l' 'Autocartografo', il primo plotter fotogrammetrico universale e, dopo il Secondo Congresso ISP nel 1926, l' 'Aerocartografo', uno strumento più leggero che incorporava le capacità di maggior controllo e di fototriangolazione.

Heinrich Wild⁶⁹ presentò, nel 1926, al Secondo Congresso Internazionale a Berlino il suo prototipo di plotter modificato, conosciuto come 'Police Autograph' e, successivamente, impiantò una fabbrica in Svizzera (Wild Heerbrugg Ltd.), per produrre e sviluppare plotter analitici. Nel 1930 la Kern Co. (ora nel gruppo Leica) di Aarau, si unì alla società fotogrammetrica.

Nel 1932 venne fabbricata la macchina fotografica Leica, modello C, quale primo apparecchio fotografico 35 mm con obiettivi intercambiabili, messa a fuoco a telemetro, 36 esposizioni e flash.

Lo svedese Bertil Hallert⁷⁰ ha contribuito molto allo sviluppo dei procedimenti dell'orientamento numerico relativo e nello stabilire i concetti di calibrazione, gli *standard* per testare le macchine fotografiche, comparatori e stereo-strumenti, utilizzando per la prima volta il termine 'errore *standard* di peso unitario'.

Negli primi anni Trenta si trova un altro importante contributo per risolvere i problemi della *space resection*, dell'orientamento, dell'intersezione, grazie al lavoro di Earl Church⁷¹ che cercando la determinazione delle coordinate della posizione della macchina fotografica (centro prospettico) attraverso l'uso di una posizione approssimativa (*approximate position*) e di un'impostazione iterativa (*iterative approach*), raggiunge un risultato di fatto rimasto virtualmente invariato fino ad oggi, separando la soluzione per gli angoli di orientamento dalle coordinate della posizione (*station*) della fotocamera. Inoltre Church affronta il problema della 'determinazione della scala', per calcolare le dimensioni degli oggetti dalle fotografie indipendentemente dalle loro posizioni assolute nello spazio.

La Seconda guerra mondiale porta la necessità di mappare le zone di guerra e questo incrementa lo studio ed il perfezionamento delle tecniche fotogrammetriche tanto che, alla fine degli anni Ottanta, si sviluppa la Fotogrammetria da satellite⁷².

Dopo la seconda Guerra mondiale, in seguito alla distruzione delle strutture produttive nei paesi europei, i centri di ricerca ed evoluzione in materia furono esportati verso i paesi del Nord America. Il settore dell'aerotriangolazione, in particolare, richiedeva sempre maggiori sviluppi.

Una volta studiata la teoria degli errori, infatti, ci si rese conto che per pianificare il lavoro era necessario ottenere la massima quantità d'informazioni dal numero di osservazioni che ciascun rilievo fotogrammetrico permetteva. Un altro problema che i ricercatori si trovarono ad affrontare fu la differenza di unità di misura (metri, piedi, ...), allo stesso modo esisteva un certo caos di sistemi di coordinate. Finalmente nel 1956, dopo numerose discussioni, è stato accettato un sistema internazionale di coordinate (ISP Archives, Congressi 1956 e 1960).

Il dopoguerra porta anche ad una maggiore consapevolezza della necessità di riunirsi in organizzazioni per portare avanti le conoscenze e gli studi sulla materia.

Nel 1953 nasce la OEEPE, (*Organisation Européenne d'Etudes Photogrammetriques*), che diventa poi una Commissione permanente della CEE. Viene fondato a Parigi il CIPA (*Comité International de Photogrammétrie Architecturale*). Nel 1955 l'americano R. K. Bean inizia la produzione di ortofoto. Nel 1958 il finlandese-canadese U.V. Helava inventa il restitutore analitico costruito poi dalla OMI, (Ottico Meccanica Italiana), fabbrica italiana fondata da Nistri e Parenti. Nel 1964 W.Schermerhon, primo ministro olandese e professore di fotogrammetria all'Università di Delft, fonda l'ITC, (*International Training Centre*), poi diventato *International for Aerospace Survey and Earth Sciences* con sede a Enschede, (Olanda).

La fotogrammetria analitica (1960-1988), grazie all'invenzione dei computer, favorì la parziale automazione del processo di restituzione, con tempi più brevi di esecuzione, ma anche con una maggiore affidabilità del dato. Infatti la restituzione fotogrammetrica non era più a discrezione dell'operatore, ma basata sulla modellazione matematica gestita dalla potenza di calcolo del computer.

Così l'evoluzione degli aeromobili ed il perfezionamento delle procedure matematiche legate all'orientamento delle immagini, la possibilità di gestire in campo digitale le coordinate di riferimento, favorirono lo sviluppo di strumenti sempre più perfezionati e portarono all'invenzione dei plotter.

Alla fine degli anni Ottanta del secolo scorso nasce la 'fotogrammetria digitale' favorita dalla comparsa delle macchine fotografiche digitali e dallo sviluppo dei computer sempre più potenti e più facilmente comprensibili grazie a linguaggi e procedimenti più celeri. Nel 1988 Kern costruisce il primo stereo-restitutore digitale e nello stesso anno a Kyoto vennero presentate le prime workstation fotogrammetriche digitali al Congresso dell'ISPRS.

Da una trentina d'anni, la fotogrammetria – come quasi tutti gli altri strumenti di misura – ha rotto con l'universo analogico poiché è stata travolta dalla rivoluzione elettronica prima e, successivamente, da quella informatica. Dopo circa un secolo di evoluzione tecnologica, è interessante notare come i progressi in *Computer Vision*, un ramo particolarmente attivo dell'informatica grafica, siano oggi

dovuti all'incontro tra metodi di calcolo algoritmico più recenti e principi matematici introdotti dal Poncelet. In effetti una macchina fotografica o una videocamera, e in generale tutte le macchine concepite per catturare la realtà restano, da un punto di vista geometrico, delle semplici macchine proiettive, le stesse descritte nei trattati del XIX secolo.

3.2 Metodologia, tipologia e campi d'impiego

La metodologia fotogrammetrica è adoperata per usi subacquei, terrestri, aerei o satellitari, ed in base alle specifiche applicazioni essa è stata solitamente suddivisa in:

- fotogrammetria terrestre se l'acquisizione dei dati avviene tramite prese effettuate dalla superficie del suolo, definita come: *Close-Range Photogrammetry* (o fotogrammetria dei vicini) quando la distanza fra l'apparecchio fotogrammetrico e l'oggetto ripreso è inferiore a circa 300 m.; fotogrammetria dei lontani, quando quest'ultimo si trova, invece, a distanze maggiori⁷³.
- fotogrammetria aerea (o aereofotogrammetria) allorché l'acquisizione dei dati sia effettuata da piattaforma aerea o satellitare.

La cosiddetta *Close-Range Photogrammetry*, impiegata soprattutto per rilievi a scala architettonica o per registrare oggetti mobili, può essere applicata ad approcci differenti in base al numero delle prese e quindi delle immagini considerate: usando un'immagine singola (approccio monoscopico), coppie (approccio stereoscopico) o più immagini (*block adjustment*). Mentre per le prime applicazioni, quali il foto-raddrizzamento, dove la restituzione prospettica della foto avviene sul piano bidimensionale di riferimento conoscendo almeno 4 punti, o il *monoplotting* in cui gli oggetti sono restituiti tridimensionalmente da un'immagine (o ortofoto) e il rispettivo modello digitale della scena⁷⁴, la ripresa da almeno due punti di vista differenti consente una ricostruzione completa in tre dimensioni.

Oggi, a seconda del campo di applicazione e della scala di impiego, i sensori con cui acquisire le immagini possono essere distinti fra terrestri, aerei o satellitari:

- *Fotocamere digitali terrestri*

Disponibili in diversi formati⁷⁵, le due principali tipologie sono definite 'compatte' (*consumer*) o 'reflex' (SLR-*type*) e si differenziano per il sensore (CCD o CMOS, a matrice o lineare)⁷⁶ e l'ottica (fissa o intercambiabile) posseduti, la stabilità, il costo, l'utilizzo, etc.

Mentre le fotocamere *consumer* hanno in genere almeno 10-15 Megapixel ad un prezzo contenuto, le macchine digitali di fascia alta dispongono di sensori di oltre 40 Megapixel. Il mercato attuale sta trovando un forte concorrente negli *smartphone* che sono dotati di fotocamere digitali sempre più evolute (a partire dai 5 fino ai 23 Megapixel) da poter essere utilizzati anche per scopi 3D.⁷⁷

Inoltre sono disponibili fotocamere panoramiche con sensori lineari, capaci di fornire immagini con grandi prestazioni metriche ad alta risoluzione (geometrica e radiometrica), ma tuttavia il loro uso è limitato a causa del costo elevato. Le immagini panoramiche sono così spesso ricavate dall'unione di una serie di immagini parzialmente sovrapposte ed acquisite da un unico punto di vista, con una fotocamera *consumer* o *reflex* ruotata attorno al suo centro di proiezione. Tale soluzione consente di acquisire immagini con un grande potenziale non solo per le esigenze visive, ma anche per le applicazioni metriche e gli scopi di modellazione tridimensionale.

- *Sensori per immagini aeree*

Oggigiorno esiste una grande varietà di sensori digitali che, montati su piattaforme aeree – fra cui aeroplani, palloni, aquiloni, elicotteri, droni, UAV, etc. – vengono solitamente classificati per le dimensioni del loro formato (piccolo, medio o grande) acquisendo le immagini mediante in modo lineare (*pushbroom line*) o *frame*⁷⁸. Tra le piattaforme aeree più recenti un recente strumento è costituito dai cosiddetti Unmanned Aerial Vehicles (UAV)⁷⁹ ovvero da piccole piattaforme, prive di equipaggio, pilotate da una postazione remota che riescono a volare anche in modo autonomo, usando piani di volo pre-programmati e con sensori di posizionamento GPS e INS (*Inertial Navigation System*) integrati⁸⁰. Di dimensioni e capacità di carico variabili, l'impiego di UAV combinato con fotocamere digitali (*consumer* o *reflex*), o addirittura con piccoli scanner laser, fornisce viste ortogonali o oblique particolarmente utili per l'acquisizione dati dei monumenti architettonici,

dei siti archeologici ed il loro contesto ambientale circostante.

- *Piattaforme e sensori satellitari*

Il progresso tecnologico ottenuto nel campo del *Remote Sensing*⁸¹, grazie ai progressi tecnologici raggiunti con le ultime generazioni di satelliti messi in orbita – come QuickBird, Ikonos II, WorldView, GeoEye, etc. – ha fornito interessanti prospettive per il futuro, soprattutto in relazione ai sensori ad alta risoluzione e SAR (*Synthetic Aperture Radar*)⁸². Infatti oggi è possibile acquisire immagini digitali, con precisioni geometriche inferiori al metro e radiometriche elevate (6-18 bit) mediante sensori, generalmente di tipo lineare ed abbinati ad ottiche adeguate, montati su piattaforme spaziali a 400-700 km di altezza. Nonostante l'acquisizione ottica dei dati tramite strumenti satellitari dipenda ancora dalla copertura nuvolosa presente, la disponibilità di grandi archivi con immagini stereo si rivela particolarmente importante per le applicazioni geomatiche ed archeologiche.

Adoperata in svariati ambiti⁸³ tale metodologia si distingue infatti, ancora oggi, dalle altre tecniche *image-based* disponibili (*shape from shading*, *shape from silhouettes*, *shape from texture*, etc.) proprio per il suo scopo primario: acquisire trasformazioni metriche, accurate e dettagliate dal punto di vista geometrico, attraverso determinati modelli di calcolo.

Del resto la maggiore precisione e la rigorosa qualità dei processi fotogrammetrici sono dimostrate dallo stesso confronto eseguito fra i sistemi *image-based* della famiglia '*shape from X*', di cui l'approccio 'stereo', ricostruendo la geometria della scena 3D da coppie o più immagini grazie al principio della triangolazione, fa parte⁸⁴. Infatti le tecniche con sensore passivo *shape from shading*, *from silhouettes*, *from texture*, etc., sfruttano una serie di riprese fotografiche per definire la forma dell'oggetto stimandone le normali delle superfici invece dei dati 3D, in virtù – rispettivamente – della sua ombreggiatura (*shading*)⁸⁵, del contorno (*silhouettes*)⁸⁶, piuttosto che della sua struttura superficiale.⁸⁷

Inoltre nonostante la fotogrammetria sia spesso associata, fino quasi ad esserne considerata un sotto-campo, al *Remote Sensing* – più legato, ovviamente, ad immagini satellitari ed al loro impiego per la classificazione del

territorio (*land classification*), per l'analisi o il rilevamento di cambiamenti di terreno⁸⁸ – essa resta una tecnica di misura finalizzata al trattamento geometrico delle immagini.

3.3 Fotogrammetria digitale

L'interesse generale di un metodo che utilizza delle misure prese su fotografie si esplicita attraverso le stesse caratteristiche di questo tipo di immagini. Esse forniscono innanzitutto un documento poco costoso, maneggevole, facilmente consultabile e sempre disponibile, dando una rappresentazione completa ed approfondita di una scena o di un oggetto che potrebbero non essere altrettanto alla portata di mano (se non addirittura andati danneggiati o distrutti).

La diffusione dell'applicazione fotogrammetrica – procedura di acquisizione dei dati metrici e tematici tra le più affidabili e precise, seppure tradizionalmente ritenuta manuale, che richiede tempo e superata, soprattutto in seguito all'avvento dei *laser scanner* 3D – ha certamente contribuito agli importanti sviluppi informatici che essa ha avuto negli ultimi decenni, registrando un incremento di prestazioni e un'automatizzazione delle tipiche procedure di restituzione.

A partire dagli anni Novanta l'avvento della fotogrammetria digitale ha determinato un cambiamento nella rappresentazione del dato, poiché il supporto dell'immagine da pellicola⁸⁹ è divenuto un sensore CCD o CMOS, fornendo così una griglia di campionamento solidale con l'ottica e costituendo un riferimento interno utilizzabile per i calcoli fotogrammetrici.

La diversa natura del dato primario, ossia un'immagine digitale in cui il contenuto fotografico (radiometria) viene registrato sotto forma di numeri ed i punti sono dati in termini di coordinate *pixel*, ha permesso un'automatizzazione delle procedure, comportando una semplificazione degli strumenti necessari.

In passato si distingueva fra fotogrammetria 'analogica' ed 'analitica' poiché si indicavano i due diversi tipi di procedure utilizzati per determinare la posizione dei punti nello spazio da immagini, dove le soluzioni erano ottenute rispettivamente tramite l'utilizzo di apparecchi ottico-mec-

canici (restitutori analogici) o comparatori (restitutori analitici). La spina dorsale dei metodi computazionali, in particolare, consisteva in vari concetti matematici e procedurali finalizzati a rappresentare le relazioni tra i punti nell'oggetto, le loro immagini corrispondenti ed appunto le procedure operazionali necessarie per risolvere la restituzione tridimensionale⁹⁰.

Quest'ultima nel mondo digitale, invece, è principalmente affidata a 'software' che sono in grado di individuare e collimare i punti, anche in modo automatico, fornendo tuttavia *output* per qualità e forma e geometria più completi. La fotogrammetria digitale si differenzia quindi da quella 'stereo' tradizionale non per il contenuto concettuale di base, ma per il prodotto ottenuto a seguito delle operazioni di acquisizione.

Mentre in stereofotogrammetria l'esito era costituito da un modello tridimensionale virtuale da cui dedurre punti significativi, determinati nelle tre dimensioni ed utili per la realizzazione di elaborati di restituzione, ciò che si ottiene con la fotogrammetria digitale è una nuvola di punti, sostanzialmente simile a quella registrata da sensori ottici attivi (come *laser scanner* 3D), dove 'la relazione tra un oggetto nello spazio e la sua proiezione su di un piano immagine – come dice De Luca – si arricchisce di una nuova dimensione: la possibilità di proiettare sulla geometria ricostruita le texture direttamente estratte dalle fotografie'⁹¹. La fotocamera, quindi, non è solo strumento che cattura la realtà, ma diviene 'macchina per proiettare la realtà'⁹².

Sfruttando lo sviluppo di algoritmi e strategie computazionali derivate dalla *Computer Vision*, la fotogrammetria digitale riesce a coniugare l'elevata accuratezza metrica e la precisione della ricostruzione 3D, derivate dai modelli di calcolo, con la rapidità di processi quasi totalmente automatizzati. La realizzazione di modelli tridimensionali da fotografie utilizzando i cosiddetti software di *Structure from Motion* (SfM) o di *Image-Based Modeling* (IBM) and *Rendering* (IBR)⁹³ – che integrano principi provenienti dai campi della visione computazionale assieme a quelli fotogrammetrici e di modellazione geometrica – diventa relativamente semplice, poiché l'apporto umano al progetto si concentra quasi esclusivamente nella fase di raccolta dati, mentre il complesso calcolo di ricostruzione della realtà risulta affidato all'intelligenza artificiale⁹⁴.

Tuttavia, quando l'obiettivo del progetto è il recupero di

un modello 3D completo, dettagliato, preciso ed affidabile, alcune interazioni dell'utente nella *pipeline* di modellazione risultano ancora obbligatorie, soprattutto per la georeferenziazione ed il controllo della qualità.

Così 'la fotogrammetria digitale non mira alla completa automazione per l'elaborazione delle immagini, ma ha sempre come primo obiettivo il recupero di risultati metrici precisi. D'altronde per le applicazioni che necessitano di modelli 3D per usi di semplice visualizzazione o applicazioni di Realtà Virtuale (VR), possono essere adottate procedure di modellazione 3D completamente automatizzate (*Structure from Motion*)⁹⁵.

3.4 Principi fondamentali della tecnica fotogrammetrica

Un'immagine fotografica (analogica o digitale) può essere considerata, dal punto di vista geometrico, come una proiezione centrale da cui è possibile restituire le posizioni 'reali' dei punti discreti rappresentati nella scena registrata. Tuttavia, determinare l'univoca corrispondenza geometrica che intercorre fra lo spazio 'immagine' (2D) della presa fotografica e lo spazio reale (3D), in cui è collocato l'oggetto da rilevare al momento dell'acquisizione, costituisce il primo quesito che il procedimento fotogrammetrico deve risolvere.

Così quando un oggetto è visto in almeno due fotografie da punti di vista differenti, affinché sia possibile relazionare qualsiasi punto presente sulle immagini con il relativo punto omologo sull'oggetto reale, ricavandone le informazioni necessarie per la ricostruzione geometrica della scena, occorre ottenere quei parametri che sono intrinseci al rapporto fra lo spazio dell'immagine e lo spazio dell'oggetto ed esprimono le proprietà del mezzo fotografico oltre che il suo orientamento.

Le diverse posizioni relative dell'oggetto nelle immagini (la cosiddetta parallasse) permettono di ottenere viste stereoscopiche e di derivare informazioni 3D della scena registrata dalle aree di sovrapposizione delle immagini.⁹⁶ Il metodo adoperato per calcolare le coordinate tridimensionali di un punto identificato in almeno due immagini, facendo riferimento 'alla trigonometria e ai principi relativi alla ricerca delle corrispondenze fra due fotografie ste-

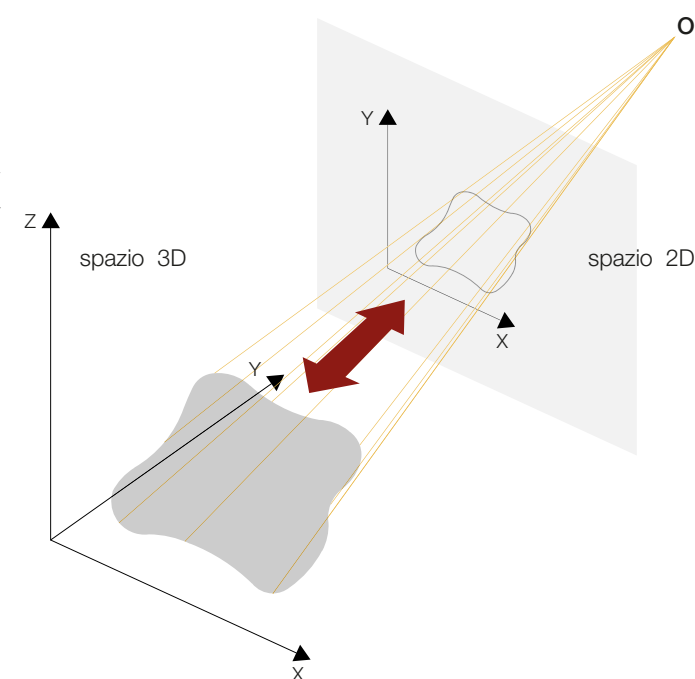


Fig. 12 – La corrispondenza geometrica descritta tramite il fascio di rette proiettive fa sì che per un punto preso sull'oggetto (spazio 3D), il suo omologo sull'immagine (spazio 2D) ed il centro di proiezione O siano allineati sulla medesima retta proiettiva.

reo' – come spiega Aldo De Santis⁹⁷ – è quello della triangolazione fotogrammetrica (o *bundle adjustment*) poiché la retta che congiunge i due centri ottici ed i molteplici raggi che, partendo dagli stessi centri ottici, si incontrano sul punto reale da acquisire, formano un triangolo.

Attraverso l'impiego del modello matematico della collinearità è possibile ricostruire, per via analitica, l'univoca relazione di trasformazione proiettiva tra lo spazio 2D delle immagini e quello omologo 3D dell'oggetto.

Il fondamento del processo fotogrammetrico viene dunque determinato dall'uso di immagini multiple, che debbono essere almeno due, ed il principio di collinearità. Esso stabilisce analiticamente appunto la relazione che esiste tra spazio oggetto e spazio immagine, definendo come il centro di proiezione della fotocamera, un punto P (x, y) sull'immagine ed il suo corrispondente punto P (X, Y, Z) nello spazio reale devono giacere su una linea retta.

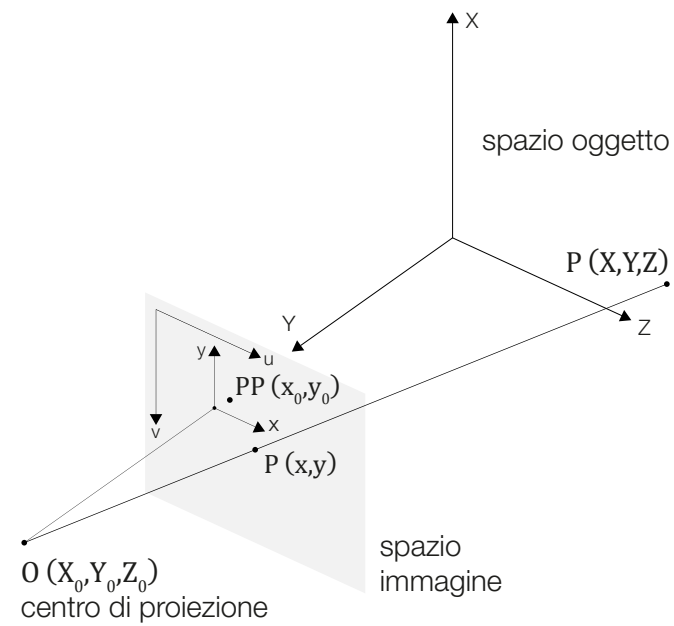


Fig. 13 – Il principio della collinearità stabilito tra il centro di proiezione della fotocamera, un punto dell'immagine (2D) e il punto corrispondente nello spazio dell'oggetto (3D).

Il modello di collinearità è formulato come:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + x_0 \\ y &= -f \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + y_0 \end{aligned} \quad [1]$$

dove la costante della fotocamera (o lunghezza focale f) e la posizione del punto principale, ossia il centro dell'obiettivo rispetto al fotogramma (x_0, y_0) costituiscono i parametri di orientamento interno⁹⁸ (IO); mentre le coordinate del centro di proiezione (posizione nello spazio della camera X_0, Y_0, Z_0), gli elementi della matrice di rotazione della camera $(r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33})$, che risulta, sono i parametri di orientamento esterno (EO).

È dunque possibile scrivere due equazioni diverse per ogni punto e per ciascuna immagine dove:

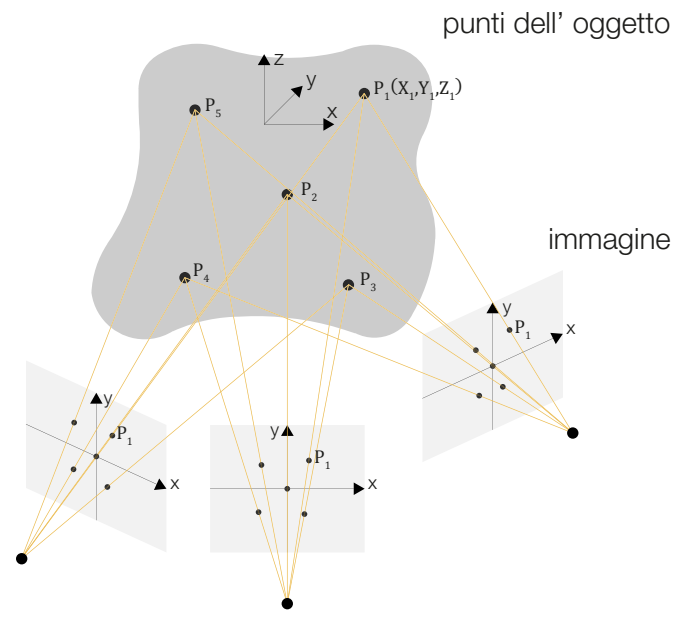


Fig. 14 – Il concetto di multi-immagine, in cui l'oggetto 3D può essere ricostruito utilizzando più raggi di collinearità tra i punti omologhi delle immagini.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad [2]$$

Ovvero dove la matrice di rotazione R risulti univocamente definita dai tre angoli (di solito indicati con ω, π, κ) e tali parametri siano generalmente ricavati usando due immagini (orientamento relativo) o un set di immagini (soluzione *bundle*).

Mentre tutte le misure effettuate sulle immagini digitali (x, y) si riferiscono ad un sistema di coordinate *pixel*, le equazioni di collinearità si riferiscono al sistema di coordinate dell'immagine metrica. La conversione dai *pixel* alle coordinate dell'immagine viene eseguita mediante una trasformazione affine conoscendo le dimensioni del sensore e della grandezza dei *pixel*.

Per ogni punto misurabile in almeno due immagini (chiamati punti omologhi o *tie points*), viene scritta un'equazione di collinearità [Eq. 1]. Tutte le equazioni formano un sistema di equazioni e la soluzione viene generalmente

ottenuta con un metodo iterativo dei minimi quadrati (modello di Gauss-Markov), richiedendo così alcune buone approssimazioni iniziali dei parametri incogniti.

Il metodo, chiamato *bundle adjustment*, determina simultaneamente tutti i parametri del sistema insieme con le stime delle precisioni e delle correlazioni delle incognite⁹⁹.

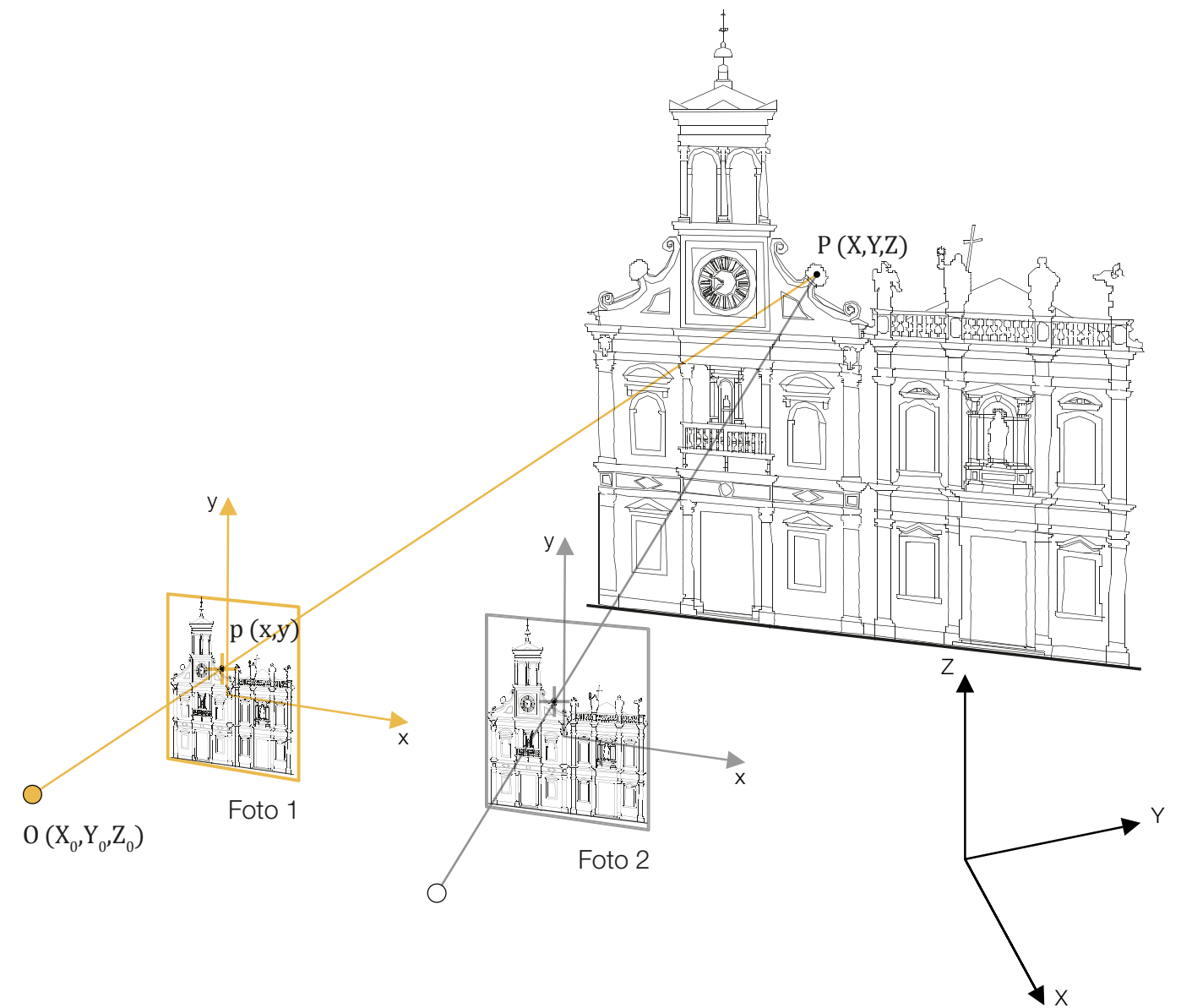


Fig. 15 – Dato un punto di presa O ed una direzione di presa, per ogni punto oggetto $P(X, Y, Z)$, l'immagine prospettica $p(x, y)$ si forma nell'intersezione fra la retta di collinearità OP e il piano del fotogramma.

Se i parametri di orientamento interno sono incogniti, il metodo è chiamato *self-calibrating bundle adjustment*.

Il sistema di equazioni non lineare è iterativamente risolto con il metodo dei minimi quadrati; dopo la linearizzazione e l'introduzione di un vettore di errore e , può essere espresso come:

$$-e = A \cdot x \cdot l \quad [3]$$

dove e è il vettore di errore; A è la matrice disegno $n \times m$ (numero di osservazioni \times numero di incognite ed $n > m$) con i coefficienti delle equazioni di collinearità linearizzate¹⁰⁰; x è il vettore delle incognite – ovvero parametri esterni, coordinate dell'oggetto 3D, eventualmente parametri interni ($X, Y, Z, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \pi, \kappa, x_0, y_0, f$) – ed l il vettore assoluto delle osservazioni (cioè le misurazioni).

Generalmente viene aggiunta una matrice dei pesi P (matrice diagonale) per ponderare le osservazioni ed i parametri incogniti durante la procedura di stima. La stima di x e del fattore di variazione σ viene di solito supposta (ma non esclusivamente) come imparziale, stima della variazione minima, effettuata mediante minimi quadrati e risulta come:

$$\hat{x} = (A^T \cdot PA)^{(-1)} \cdot A^T P l \quad [4]$$

con i residui delle osservazioni v calcolati come:

$$v = A \cdot \hat{x} - l \quad [5]$$

e la deviazione standard a posteriori (σ_0) come:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{v^T \cdot P v}{r}} \quad [6]$$

dove r è la ridondanza del sistema (il numero di osservazioni m meno il numero di incognite n).

Il σ_0 finale del *bundle adjustment* fornisce una stima sulla qualità della procedura e delle osservazioni (coordinate immagine dei punti omologhi).

La precisione del parametro vettore è controllata dalla sua matrice di covarianza¹⁰¹

$$C_{xx} = \sigma_0^2 (A^T \cdot PA)^{(-1)} \quad [7]$$

Affinché ($A^T \cdot PA$) sia singolarmente invertibile, e quindi il sistema risolto come richiesto in [Eq. 3], risulta necessario fissare un *datum* esterno, cioè i sette parametri di una trasformazione di similarità spaziale tra spazio immagine e spazio oggetto. Ciò viene ottenuto, ad esempio, importando almeno le coordinate di tre punti di controllo a terra (GCP).

Un'altra possibilità è quella di risolvere il sistema di equazioni [Eq. 2] in una modalità *free-network* fornendo la distanza di almeno un oggetto conosciuto per recuperare la scala corretta. La scala è molto importante e deve essere fatta nell'ambito della procedura di *bundle adjustment* (e non a posteriori, una volta che il modello è ottenuto) altrimenti la possibile deformazione del blocco non può essere compensata.

Nel caso in cui siano disponibili punti di controllo, è possibile calibrare una camera anche utilizzando un'immagine singola (resezione spaziale, in inglese *space resection*), ottenendo tuttavia un risultato di qualità decisamente inferiore rispetto al processo *bundle*.

A seconda dei parametri che vengono presi in considerazione, sia noti che con valori incogniti, le equazioni di collinearità portano a differenti procedure.

Queste non solo descrivono le relazioni tra punti immagine omologhi e punti oggetto attraverso i parametri interni ed esterni della fotocamera utilizzata, ma vengono estese per modellare e compensare tutti i possibili errori sistematici presenti all'interno del sistema 'camera'¹⁰².

Come già considerato, il metodo di ricostruzione fotogrammetrica si basa su un minimo di due immagini dello stesso oggetto acquisito da punti di vista diversi. Definendo 'B' la linea di base tra le due immagini e 'D' la distanza media tra fotocamera e oggetto, un rapporto ragionevole tra 'B' e 'D' (base/profondità) tra le immagini dovrebbe garantire una forte configurazione geometrica e ricostruzione che è meno sensibile agli errori di rumore e di misura.

Nella fotogrammetria terrestre, un valore tipico del rapporto 'B/D' dovrebbe essere intorno a 0.5, anche se in situazioni pratiche questo requisito è spesso molto difficile da soddisfare. In generale quando la linea di base è maggiore, la precisione delle coordinate degli oggetti calcolati risulta migliore, tuttavia con linee di base molto estese possono sorgere problemi nel trovare automaticamente le

stesse corrispondenze nelle immagini, a causa degli elevati effetti prospettici.

Inoltre, la precisione delle coordinate calcolate dell'oggetto 3D (σ_{xyz}) dipende dalla precisione di misurazione dell'immagine (σ_{xy}), dalla scala dell'immagine e dalla geometria (ad esempio il numero di scala S), da un fattore empirico q e dal numero di immagini k ¹⁰³:

$$\sigma_{xyz} = \frac{qS\sigma_{xy}}{\sqrt{k}} \quad [8]$$

Il principio di collinearità e il modello di Gauss-Markov dei minimi quadrati sono validi e vengono utilizzati in tutte quelle immagini acquisite con sensori *frame* (ad esempio una fotocamera reflex-SLR)¹⁰⁴.

3.5 Pipeline di modellazione fotogrammetrica

L'intero flusso di lavoro (in inglese *workflow*) fotogrammetrico utilizzato per ricavare informazioni 3D metriche e precise di una scena da una serie di immagini consiste in: (1) la calibrazione della fotocamera e l'orientamento dell'immagine; (2) le misure e la restituzione 3D; (3) la generazione della superficie; (4) *texture mapping* e visualizzazione. Rispetto al flusso di lavoro dei sensori attivi *range-based*, la differenza principale rimane nella derivazione della nuvola di punti 3D: mentre i sensori *range* (cioè gli scanner laser) forniscono direttamente i dati 3D, la fotogrammetria richiede l'elaborazione matematica dei dati dell'immagine per ricavare le nuvole di punti 3D sparse o dense utili per ricostruire digitalmente la scena rilevata.

3.5.1 Calibrazione della fotocamera e l'orientamento delle immagini

La calibrazione della fotocamera e l'orientamento delle immagini sono procedure di fondamentale importanza, soprattutto per tutte le applicazioni – come quelle richieste nel campo dei Beni Culturali – che si basano sull'estrazione di informazioni geometriche 3D accurate da immagini. Lo sviluppo delle prime teorie e formulazioni sulle procedure di orientamento risale a più di 50 anni fa ed oggi,

infatti, ci sono numerosi sistemi ed algoritmi disponibili.

La calibrazione del sensore e l'orientamento dell'immagine, anche se concettualmente equivalenti, seguono strategie diverse in base ai sensori delle immagini impiegati. Del resto, mentre in passato venivano adoperate camere metriche, nate esclusivamente per fini fotogrammetrici e di cui si conoscevano già le informazioni di calibrazione¹⁰⁵, oggi si utilizzano camere digitali di vario genere che si differenziano – come già considerato precedentemente – per tipo di sensore, ottica, stabilità, costo, etc. Perché, quindi, una camera digitale possa essere utilizzata ai fini metrici e per ottenere informazioni 3D dettagliate ed affidabili, debbono essere determinati i parametri di orientamento interno (IO) della macchina mediante una procedura chiamata proprio 'calibrazione'. Questa costituisce un prerequisito per i sistemi di rilievo metrico tridimensionale che partono da immagini e può essere suddivisa in calibrazione geometrica e radiometrica, tuttavia nell'ambito di tesi sarà trattata solo la calibrazione delle fotocamere *frame* terrestri.

Così mentre la fase di calibrazione della fotocamera determina i relativi parametri interni (IO), quelli esterni (EO) vengono ottenuti con la procedura di orientamento dell'immagine. Le due operazioni sono spesso distinte in fotogrammetria, partendo dal fatto che caratteristiche ottimali di un network di immagini per la calibrazione della fotocamera differiscono dalle circostanze migliori per l'orientamento dell'immagine.

Ci sono altri approcci che uniscono la determinazione dei parametri interni ed esterni utilizzando lo stesso insieme di immagini e lo stesso procedimento, tuttavia i loro risultati sono normalmente scadenti e non molto precisi.

3.5.1.1 Calibrazione geometrica della fotocamera

La calibrazione geometrica di una fotocamera – come dice Fabio Remondino – è definita come la determinazione delle deviazioni della realtà fisica da un sistema di *imaging* geometricamente ideale basato sul principio della collinearità: la macchina con foro stenopeico¹⁰⁶.

A differenza delle applicazioni – come la CV – dove tale fase corrisponde alla sola determinazione della lunghezza focale, in fotogrammetria vengono calcolati solitamente

tutti i parametri di calibrazione ai fini di una restituzione accurata, determinando così la deviazione geometrica (collinearità) fraposta fra la realtà ed il *network* di acquisizione di immagini. Una macchina fotografica risulta pertanto calibrata quando se ne conoscono la lunghezza focale, la compensazione del punto principale ed una serie di parametri addizionali (AP). Infatti la procedura di calibrazione della fotocamera si basa sul modello matematico della collinearità, ma di solito le equazioni usate sono estese con termini di correzione aggiuntivi, definiti appunto AP, per modellare gli eventuali errori sistematici all'interno della camera¹⁰⁷, riducendo la realtà fisica della geometria del sensore nel modello prospettico.

D'altronde, come è noto, la formazione di un'immagine fotografica differisce dal modello matematico – geometrico, ideale e semplificato – poiché vi sono inevitabilmente alcuni errori sistematici indotti dalla fotocamera, i quali provocano uno spostamento del punto immagine nella posizione teorica.

Generalmente è possibile classificare le procedure di calibrazione seguendo molteplici criteri¹⁰⁸, talvolta la classificazione più specifica è quella fatta in base alla stima dei parametri e della tecnica di ottimizzazione impiegata:

- Le tecniche lineari si distinguono per la semplicità e la velocità del loro processo, tuttavia di solito non possono gestire la distorsione della lente e necessitano di un punto di controllo con coordinate note. Esse semplificano il modello di fotocamera, portando a risultati di bassa precisione. Un esempio di tale tecnica è la cosiddetta *Direct Linear Transformation (DLT)*¹⁰⁹;
- Le tecniche non lineari come l'equazione estesa del modello collinearità, che costituisce la base della *self-calibration* attraverso il *bundle adjustment*, sono quelle maggiormente impiegate in campo fotogrammetrico poiché consentono una modellazione rigorosa ed accurata dei parametri di orientamento interno della fotocamera e di distorsione dell'obiettivo¹¹⁰ mediante il processo di stima iterativo ai minimi quadrati;
- Una combinazione di tecniche lineari e non lineari, in cui è impiegato un metodo lineare per recuperare le approssimazioni iniziali dei parametri, dopo il quale l'orientamento e la calibrazione vengono iterativamente raffinati¹¹¹. Tale approccio sviluppato in due fasi è stato,

per molti aspetti, superato dalla calibrazione più precisa ottenuta tramite il *bundle adjustment*, il quale è anche implicitamente un processo a due fasi.

Il modello che si è dimostrato il più efficace, soprattutto per i sensori a corto raggio, è quello sviluppato da D. Brown¹¹²; esso esprime le correzioni ($\Delta x, \Delta y$) da applicare alle coordinate delle immagini misurate (x, y) [Eq. 9-10], al fine di riportare la realtà fisica della geometria del sensore al modello teorico [Eq. 11].

Mentre x e y rappresentano le coordinate misurate, x_0 e y_0 quelle relative al punto principale.

Il modello di Brown viene chiamato 'modello fisico' poiché tutti i suoi componenti possono essere direttamente attribuiti a fonti fisiche di errore. Esso contiene, oltre ai tre termini $\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f$ per la correzione degli elementi di orientamento interni: i parametri K_i di distorsione della lente radiale; i parametri P_i della distorsione tangenziale; S_x è il fattore di scala in per compensare possibili pixel non quadrati ed il fattore affine per la non-ortogonalità e la deformazione geometrica del *pixel*¹¹³. I tre parametri addizionali (punti di accesso) utilizzati per modellare la distorsione radiale M sono generalmente espressi tramite il polinomio di ordine dispari $M = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7$ dove rappresenta la distanza radiale. Il comportamento della distorsione radiale risulta variare a seconda della lunghezza focale come viene mostrato dal tipico profilo M dovuto a distorsione gaussiana (Fig. 17a). I coefficienti K_i di sono strettamente correlati fra loro e l'errore viene valutato, almeno per la maggiore parte, tramite il termine cubico $K_1 r^3$. I parametri K_2 e K_3 vengono impiegati per applicazioni fotogrammetriche a bassa distorsione e per lenti grandangolari, oltre che quando viene richiesta un'elevata precisione nelle valutazioni metriche. Alcune ricerche recenti hanno dimostrato come sia possibile modellare la distorsione radiale in modo empirico partendo da taluni valori noti a determinate lunghezze focali.

La distorsione tangenziale è dovuta ad una mancanza di centratura (o decentramento) della lente lungo l'asse ottico. I parametri di distorsione tangenziale P_1 e P_2 sono sempre fortemente correlati con la posizione del punto principale, e quindi con x_0 e y_0 .

Anche la distorsione radiale, essendo in genere di un ordine di magnitudine inferiore alla quella radiale, varia con

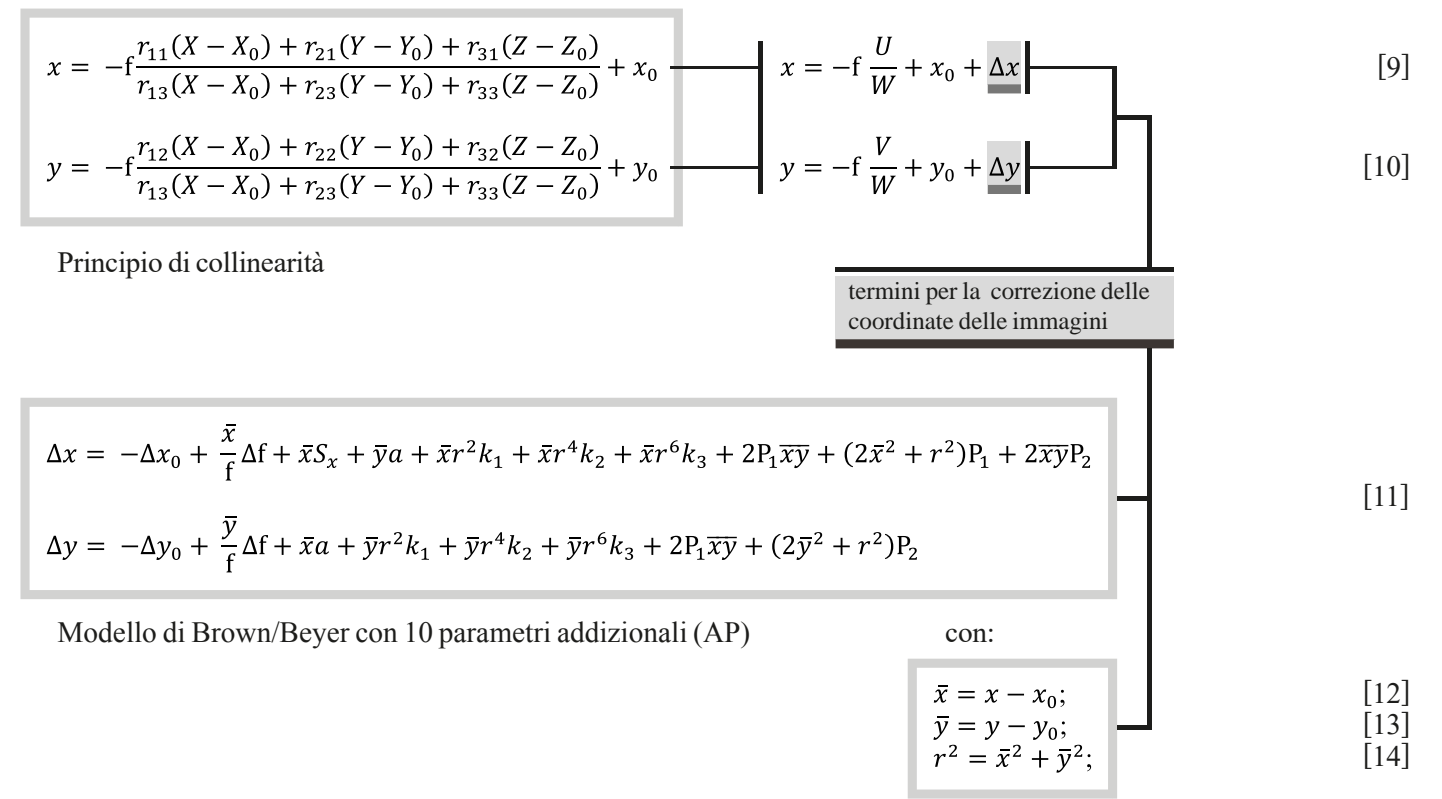
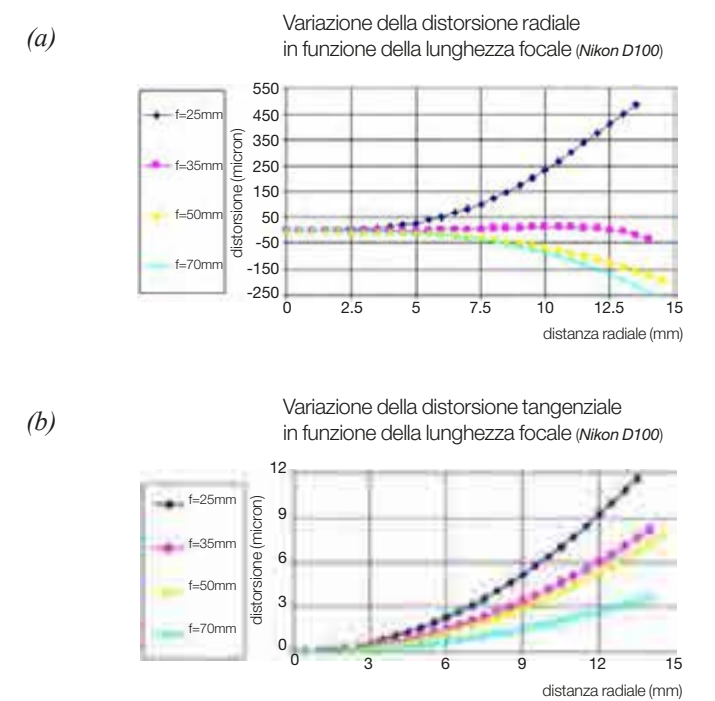


Fig. 16 – (sopra) Le equazioni di collinearità estese con dei parametri aggiuntivi per modellare errori sistematici e deviazioni dalla collinearità.

Fig. 17 – (a destra) L'andamento caratteristico della distorsione radiale (a) e tangenziale (b) al variare della lunghezza focale della fotocamera digitale (Cfr. F. Remondino, C. Fraser, *Digital camera calibration methods: considerations and comparisons*, IAPRS, vol. XXXVI(5), Dresden, 2006, p. 269).



la lunghezza focale della lente, seppure in modo inferiore, come indicato dal tipico profilo (Fig. 17b).

L'accoppiamento proiettivo tra P_1 e P_2 e gli spostamenti del punto principale ($\Delta x_0, \Delta y_0$) aumentano con l'aumentare della lunghezza focale e possono essere problematici per obiettivi ad ampia lunghezza focale. Il grado di accoppiamento può essere diminuito, durante la procedura di calibrazione, sia attraverso l'uso di una matrice dei punti dell'oggetto 3D che mediante l'adozione di angoli di elevata convergenza per le immagini.

Come già anticipato, la soluzione *self-calibration* del *bundle adjustment* può essere eseguita con o senza vincoli dello spazio oggetto, spesso sotto forma di punti di controllo noti. Per definire il *network* è comunque sempre richiesto un numero minimo di vincoli, i quali possono essere impliciti come vincoli interni, in modalità *free-network*, o espliciti mediante una configurazione minima di punti di controllo (arbitraria o reale)¹¹⁴.

La soluzione *self-calibration* mediante *bundle adjustment* conduce, dunque, alla stima di tutti i parametri interni e addizionali, a partire da un insieme di corrispondenze delle immagini (punti omologhi) misurate manualmente o automaticamente. Di conseguenza divengono fondamentali, per la medesima qualità dell'auto-calibrazione, la geometria globale dell'oggetto da rilevare e la configurazione delle stazioni di presa della fotocamera.

A tale proposito i numerosi studi sperimentali, che sono stati condotti nell'ambito della fotogrammetria *close-range*¹¹⁵, forniscono oggi alcuni buoni consigli e regole pratiche per eseguire una corretta operazione, riassunti come segue:

- acquisire una serie di immagini dell'oggetto di interesse, eventualmente munito di mire codificate (in inglese *coded targets*) che possono essere automaticamente e accuratamente misurate nelle immagini;
- la geometria del network di immagini per essere favorevole deve comprendere immagini convergenti, riprese a distanze diverse rispetto l'oggetto 3D, ruotando la camera di ± 90 gradi – al fine di diminuire le correlazioni fra i parametri – e con una distribuzione uniforme dei punti dell'oggetto nelle immagini;
- la precisione della rete di immagini (e quindi della procedura di calibrazione) cresce all'aumentare degli angoli di convergenza fra le diverse posizioni di ripresa, all'aumentare del numero di raggi per ogni punto dell'oggetto rilevato, sebbene tale aumento sia proporzionale al quadrato del numero di immagini di quel determinato punto¹¹⁶;
- l'accuratezza cresce con il numero dei punti misurati per ogni immagine, benché ce ne siano almeno una decina per ciascuna (è importante che punti aggiuntivi all'interno dell'immagine siano ben distribuiti sul

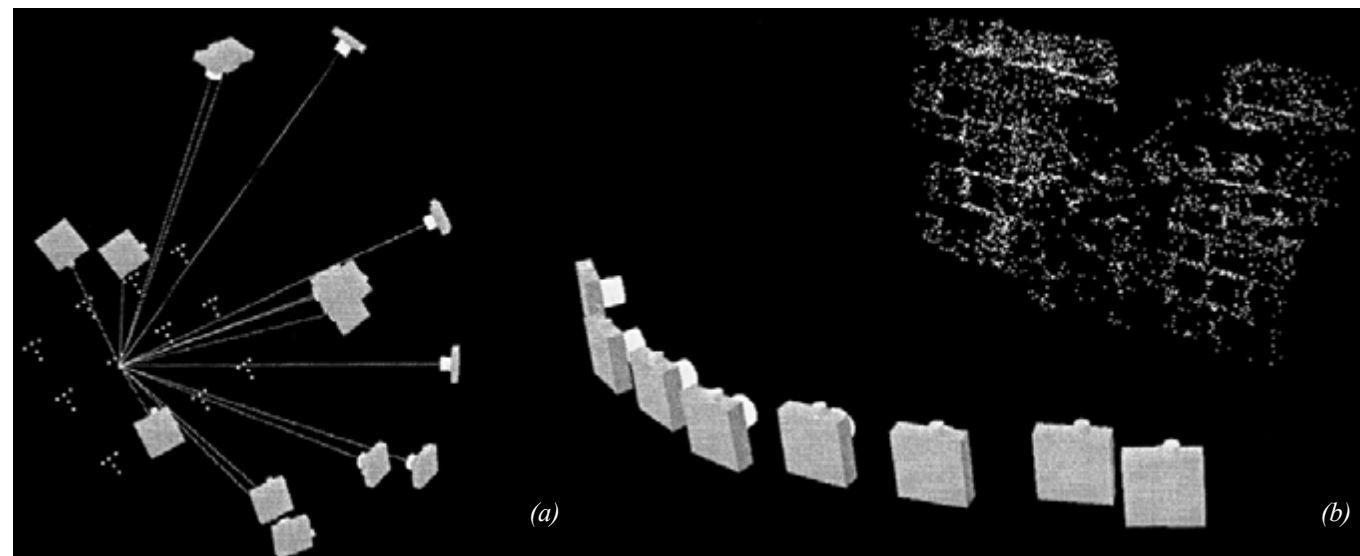


Fig. 18 – Tipico network di immagini terrestri acquisite ad-hoc per la procedura di calibrazione della fotocamera digitale, con immagini convergenti e ruotate (a). Configurazione di immagini ottimale al fine di una ricostruzione 3D (b).

- sensore);
- è possibile adoperare una matrice di punti appartenenti ad un oggetto planare (in inglese *testfield*) per la calibrazione della fotocamera se le immagini vengono acquisite con angoli di rotazione ortogonali al piano da rilevare, un alto grado di convergenza e siano, preferibilmente, a distanze differenti dall'oggetto;
- l'acquisizione di immagini ruotando la fotocamera di ± 90 gradi ha la funzione di ridurre l'accoppiamento proiettivo fra i parametri di orientamento interno ed esterno. Nonostante sia possibile raggiungere tale disaccoppiamento senza ruotare di 90° le immagini tramite l'utilizzo di *testfield* tridimensionali, è sempre preferibile avere immagini ruotate nel network di calibrazione.

Sebbene l'affidabilità dell'auto-calibrazione – ovvero la determinazione dei parametri interni ed esterni nel medesimo istante – dipenda da una geometria del *network* di immagini favorevole ai fini di un buon rilievo; oggi la soluzione *self-calibration* tramite il *bundle adjustment* è un processo completamente automatico. Infatti quest'ultimo richiede esclusivamente che le immagini siano registrate in un'opportuna geometria a più stazioni (*multi-station geometry*), che sia svolta una stima iniziale della lunghezza focale, delle caratteristiche del sensore dell'immagine e di alcuni *coded targets* che formano una matrice di punti dell'oggetto 3D. In definitiva per calibrare una macchina fotografica potrebbe essere addirittura possibile utilizzare semplicemente un foglio di carta piano (bidimensionale) con alcune mire, prestando tuttavia grande attenzione alla fase di acquisizione delle immagini, data la piattezza della scena.

3.5.1.2 Orientamento delle immagini

Quando viene acquisita una serie di immagini per rilevare un oggetto, è necessario considerare che un dettaglio può essere ricostruito tridimensionalmente se è visibile in almeno due immagini. La procedura di orientamento viene così svolta, prima per determinare la posizione e la vista (angoli) dove le immagini sono state acquisite, dopo

per ricavare le informazioni 3D, sfruttando il principio di collinearità. La fase di orientamento, successiva a quella di calibrazione, consiste nel trovare i parametri di orientamento esterno (3 posizioni e tre rotazioni) di ogni immagine adoperata, i quali vengono sempre calcolati mediante la procedura di *bundle adjustment* ed il principio di collinearità. Una volta ottenute le immagini ed i relativi parametri di calibrazione, deve essere identificato (manualmente o automaticamente) un insieme di punti omologhi fra le immagini – almeno 5 per coppia – rispettando il fatto che i punti risultino ben distribuiti nell'immagine e non siano né complanari né allineati. Per ciascuno dei punti immagine (e per il suo corrispondente nello spazio) viene scritta un'equazione di collinearità.

Le osservazioni delle immagini vengono quindi utilizzate per formare un sistema di equazioni di collinearità [Eq. 1], che sono risolte iterativamente con il modello di Gauss-Markov dei minimi quadrati [Eq. 3-4] al fine di ricavare le coordinate tridimensionali dei punti di appoggio (punti omologhi) misurati, i parametri di orientamento esterno della fotocamera, oltre che i valori statistici dei parametri incogniti. In tale fase i parametri interni della camera sono considerati fissi diversamente dal momento di calibrazione dove questi risultavano incogniti.

È bene considerare, comunque, che un tipico insieme di immagini acquisite per scopi di ricostruzione 3D, forma un *network* che non è generalmente adatto per una procedura di calibrazione. Quindi è sempre meglio separare le due fasi fotogrammetriche o adottare un insieme di immagini adatte per entrambe le procedure.

Il sistema di equazioni può essere risolto in modo relativo o assoluto¹¹⁷, tuttavia in applicazioni *close-range*, si può procedere anche in modalità *free-network*, evitando di ricorrere a punti di controllo, sebbene sia sempre necessario definire una distanza nota fra due punti visibili in almeno due immagini per ottenere un esito metrico e scalato correttamente.

3.5.2 Misure e restituzione fotogrammetrica 3D

Dopo il recupero dei parametri di calibrazione ed orientamento, prende avvio la cosiddetta fase di restituzione tridimensionale dell'oggetto, o della scena, tramite ulterio-

ri misure (manuali, semiautomatiche o automatiche) dei punti omologhi fra le immagini, selezionati preferibilmente nelle zone più significative dell'oggetto da restituire. Le corrispondenze misurate dell'immagine 2D vengono di seguito convertite in coordinate 3D – spaziali ed univoche – dell'oggetto (nuvole di punti 3D) sfruttando il principio di collinearità ed i parametri esterni ed interni ormai noti.

In base alle esigenze dell'oggetto, o della scena, da rilevare, si possono ricavare nuvole di punti 'dense' o 'sparse', quali modelli che contengono un numero di punti restituiti in 3D rispettivamente differente.

Le misurazioni manuali (interattive), eseguite in modalità monoculare o stereoscopica, generano nuvole di punti 'sparse' necessarie per determinare le principali geometrie in tre dimensioni e le discontinuità di un oggetto. Le ricostruzioni 3D sparse sono adeguate per le applicazioni di modellazione architettonica e urbana 3D o, come nel caso di edifici o semplici strutture archeologiche, dove impiegando pochi punti si identificano gli angoli e gli spigoli che definiscono le forme geometriche principali. Per tali tipi di modelli 3D è prevista una precisione relativa in una scala che va da 1:5.000 fino a 1:20.000.

Le procedure automatiche (chiamate *dense image matching*), invece, vengono impiegate quando sono necessarie misure di oggetti complessi con superfici irregolari e ricostruzioni dense ai fini di una restituzione assai dettagliata delle discontinuità rilevate; come ad esempio per ricavare il modello di superficie digitale (DSM) o per documentare bassorilievi o altorilievi, statue, aree di scavo o particolari reperti, etc. Del resto gli sviluppi raggiunti negli ultimi anni riguardo alla correlazione automatica di immagini¹¹⁸ stanno dimostrando le ampie potenzialità del metodo fotogrammetrico per ricostruzioni 3D precise e dettagliate a scale di lavoro differenti, le quali sono ormai 'paragonabili – come dice Fabio Remondino – alle nuvole di punti ottenute con sensori ottici attivi e con un ragionevole livello di automazione'¹¹⁹. In tal modo, dopo aver estratto le corrispondenze fra le immagini, possono essere calcolate le coordinate 3D dell'oggetto, impiegando ancora una volta le equazioni di collinearità ed i parametri interni ed esterni già ricavati.

Gli aspetti problematici riscontrabili nella fase di correlazione fra le immagini – come l'automazione completa, l'occlusione di punti, la presenza di aree senza tessitura

o con elementi ripetuti, oggetti in movimento (incluse le ombreggiature), oggetti trasparenti, etc. – sono stati oggetto d'interesse da parte della comunità scientifica almeno negli ultimi tre decenni. Soprattutto nelle applicazioni fotogrammetriche *close-range*, i maggiori problemi dipendono dalle caratteristiche tridimensionali dell'oggetto rilevato e dalle immagini spesso convergenti ed acquisite con ampie basi di presa¹²⁰. Oggigiorno sono comunque disponibili svariati programmi e software, sia proprietari che *open-source* o *web-based* per ricavare nuvole di punti sparse o dense partendo da una semplice serie di immagini (*Photomodeler scanner*, *MicMac*, *PMVS*, etc.)¹²¹.

3.5.3 Generazione del modello poligonale

Una volta ottenute le nuvole di punti sparse o dense viene prodotto un modello poligonale – *mesh*¹²² o TIN¹²³ –, ai fini di una migliore visualizzazione o per la seguente fase di texturizzazione, proiettando direttamente le immagini (in applicazioni *close-range*) o creando ortofoto (in applicazioni aeree o satellitari).

La *mesh*, quale rappresentazione della superficie di frontiera determinante lo spazio occupato da un oggetto 3D per mezzo di un'approssimazione discreta, definita da un insieme di facce poligonali riconducibili a triangoli, consente di gestire la superficie in maniera assai flessibile, restituendone appunto una rappresentazione precisa.

Quindi l'obiettivo della fase di *meshing* consiste nel generare una superficie *S* in grado di approssimare quella 'reale' *S* a cui appartengono i punti della nuvola di punti misurati sull'oggetto. Tale procedura di ricostruzione, affinché la restituzione di *S* sia esatta, non può usare solamente le informazioni su un numero limitato di punti *P*, ma sfrutta altre informazioni riguardanti la medesima superficie quali, ad esempio, le discontinuità presenti che, all'aumentare della densità di campionamenti, rendono *S* topologicamente più corretta, facendola convergere verso l'originale *S*. Da ciò si può dedurre come la generazione della superficie sia suddivisa in diverse sotto-fasi, le quali possono essere completate in ordine diverso a seconda della sorgente di dati 3D. Infatti, in caso di nuvole di punti sparse, gli elementi poligonali vengono normalmente creati con una procedura interattiva, l'insieme di punti viene segmentato,

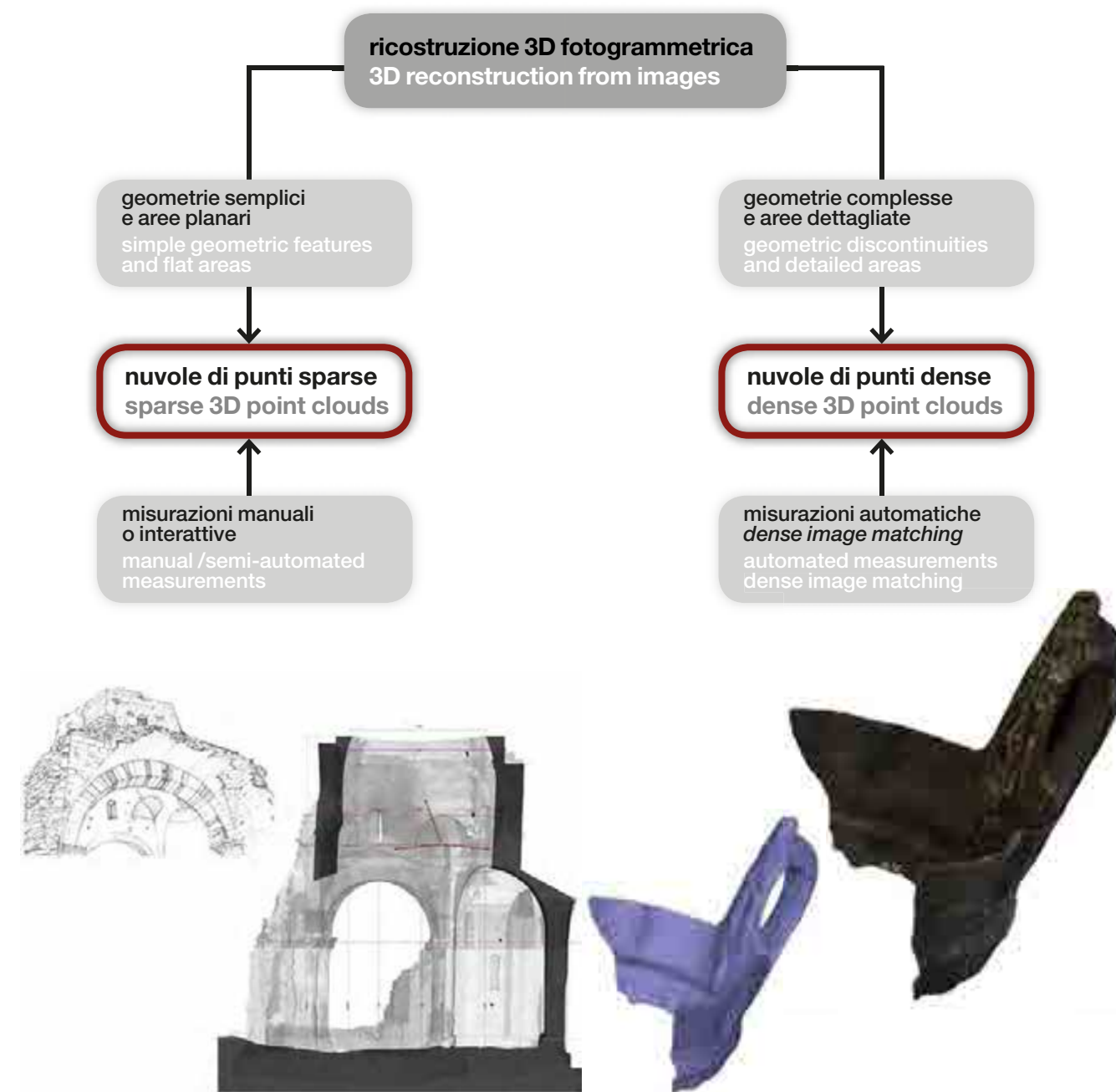


Fig. 19 – Nella fase di restituzione fotogrammetrica 3D l'impiego di approcci manuali interattivi, piuttosto che automatici, dipende innanzitutto dalla tipologia geometrica dell'oggetto rilevato.

creando in primo luogo linee, poi poligoni ed infine superfici. Invece in caso di nuvole di punti dense, mentre il passaggio a modello poligonale è un passo abbastanza diretto per nuvole di punti strutturate, per una nuvola di punti non strutturata tale conversione non è così immediata.

Il passaggio dal modello discreto dell'oggetto, o della scena, ad una rappresentazione mediante superfici continue avviene grazie all'applicazione di specifici algoritmi, che affrontano il problema con approcci differenti. Tra i più sofisticati e versatili ci sono il calcolo *Poisson Reconstruction* e il *Ball Pivoting Surface Reconstruction*¹²⁴.

In tale fase, ad eccezione dell'importante scelta effettuata dall'operatore per individuare quale metodo sia maggiormente confacente alle esigenze del caso¹²⁵, la procedura pare quasi ormai del tutto demandata all'intelligenza artificiale. In generale, comunque, se le informazioni risultano adeguatamente distribuite sulla superficie, in modo tale che la densità dei punti diminuisce nelle aree piane e aumenta in quelle con maggiore discontinuità, l'algoritmo di generazione della *mesh* ricostruirà correttamente la superficie; quando invece le informazioni acquisite mostrano elevato 'rumore' o, ad esempio, punti non ben distribuiti, l'algoritmo produrrà esiti non buoni.

Nel caso in cui si ottenga, per esempio, una proiezione di punti 3D su un piano o su un'altra superficie primitiva, può essere richiesto l'impiego di un approccio specifico – come quello di triangolazione diretta di *Delaunay*¹²⁶ – per ricercare la connessione più corta tra i punti e generare un insieme di possibili triangoli, i quali vengono poi riproiettati nello spazio 3D e topologicamente verificati.

Oggi è disponibile un'ampia varietà di software e pacchetti commerciali che eseguono la generazione di superfici da una nuvola di punti in modo semi o completamente automatico, tuttavia la fase di triangolazione resta al centro di ogni procedura proposta.

3.5.4 Texture mapping e visualizzazione

In seguito alla ricostruzione delle superfici del modello 3D l'estrazione e la mappatura del colore da immagini fotografiche, al fine di elaborare modelli capaci di riprodurre l'apparenza visiva delle forme, fornisce allo stesso tempo una completa rappresentazione geometrica dell'aspetto ed

una visualizzazione interattiva illimitata. Lo scopo di tale estrazione corrisponde perciò ad aggiungere le informazioni cromatiche 2D (*texture*), contenute nelle fotografie, all'informazione 3D (geometria) ottenuta attraverso le precedenti operazioni di *meshing*.

Simulare l'apparenza visiva significa così riprodurre i caratteri dell'aspetto esteriore delle superfici in modo coerente, sia con la restituzione dei dati radiometrici che con la geometria dell'oggetto. Di conseguenza, soprattutto nella modellazione *reality-based*, la gestione e la procedura di mappatura delle informazioni del colore – ovvero un insieme di immagini digitali della scena rilevata – sulla riproduzione 3D, viene eseguita tramite un modello di proiezione predefinito e proiettando su ciascuna *mesh* un'informazione RGB derivante dalle immagini fotografiche¹²⁷. Il *mapping* corrisponde dunque ad una trasformazione tra due sistemi di coordinate: lo spazio 2D della *texture* e lo spazio 3D della scena. Dopo che i contorni del modello sono proiettati nell'immagine, in funzione dei parametri di proiezione relativi ad una camera orientata, le coordinate UV della *texture* vengono assegnate in modo affine alla geometria¹²⁸. Del resto una *texture* (in tale caso atlante di *texture*) è una porzione di un piano u, v le cui coordinate (da 0 a 1) sono associate ai vertici di una *mesh*, e la mappatura UV consiste proprio nell'assegnare tale porzione dell'immagine a ciascun triangolo della superficie tridimensionale corrispondente.

Le relazioni tra la geometria e le *texture* vengono così garantite tramite le medesime coordinate UV. Per ogni triangolo del modello poligonale viene selezionata la porzione dell'immagine fotografica migliore, ossia quella che introduce la distorsione minore e qualità radiometrica più alta, elaborando una tessitura unitaria che integra le varie immagini RGB di *input*, eliminandone le eventuali discontinuità di bordo fra di esse¹²⁹.

Dal momento in cui il livello di dettaglio di una *texture* dipende principalmente dall'estensione della posizione dell'immagine utilizzata e dalla risoluzione, la scelta dell'immagine migliore per estrarre l'informazione colore segue due criteri: a partire dalla proporzionalità diretta fraposta tra il livello di dettaglio della *texture* e lo spazio occupato dalla proiezione sull'immagine – tanto più grande sarà quest'ultimo tanto più elevato sarà il dettaglio ottenuto – a quella diretta fra la distribuzione migliore dei

pixel della *texture* sull'immagine e l'ortogonalità dell'asse di mira della fotocamera rispetto alla regione del modello 3D durante la fase di acquisizione.

Fra le modalità di visualizzazione del modello poligonale 3D disponibile¹³⁰, una volta eseguita l'operazione di *meshing*, quella *textured* risulta dunque essere l'output di documentazione migliore poiché foto-realistico e più completo non solo ai fini della sua visualizzazione e manipolazione. Le tecniche di *texture mapping* sono state infatti impiegate ampiamente negli ultimi due decenni per aumentare il senso di realismo delle scene generate in forma digitale¹³¹.

A partire dalle applicazioni pionieristiche sulla visualizzazione dei modelli tridimensionali riguardanti restituzioni di architetture con ortofoto e oggetti in modalità *wireframe*, lo sviluppo di rappresentazioni 3D sempre più realistiche è stato possibile grazie al supporto di prestazioni grafiche ed informatiche – oltre che di acquisizione – degli strumenti utilizzati in continua evoluzione.

Analogamente a quanto avviene per 'raddrizzare' una fo-

tografia, al fine di poterla usare come supporto di misura e restituzione 2D della facciata di un edificio, la relazione instaurata fra i due piani aventi orientamenti differenti – piano immagine della foto e piano di restituzione sulla quale essa è proiettata – per l'apparenza visiva di un oggetto si estende a tutti gli elementi – e quindi a tutti i piani – di cui l'oggetto medesimo è composto.

Mappare un'immagine su un modello fotogrammetrico, derivato dalle medesime immagini, esige il ricorso a quei parametri già noti, ricavati con la procedura di *bundle adjustment*, per proiettare la tessitura sul modello. Mentre in fotogrammetria *close-range* ad ogni poligono di questo risultano quindi associati i valori RGB provenienti dalle varie immagini di *input*, in fotogrammetria aerea e satellitare, le *textures* sono chiamate generalmente ortofoto (o fotoraddrizzamenti), ossia immagini in cui è stato tolto l'effetto prospettico derivato dall'acquisizione fotografica. Queste vengono, prima, generate direttamente o indirettamente mediante il modello digitale, poi mappate su di esso con un metodo proiettivo ortogonale.



Fig. 20 – Modello 3D ottenuto mediante fotogrammetria digitale di una base per statua dalla forma tronco-piramidale rinvenuta a Poggio Colla. La restituzione della *texture* sul modello *mesh* ne permette l'aspetto foto-realistico.

Così l'immagine RGB può essere salvata in una nuova immagine – la *texture* appunto – o invece salvata per ciascun vertice della *mesh (color-vertex)*¹³², scelta di solito valida per nuvole di punti di grandi dimensioni. In tali casi la generazione della *mesh* potrebbe essere assai impegnativa tanto che, per la visualizzazione foto-realistica, è vantaggioso l'uso di metodi definiti *point-based texturing*, dove ad ogni punto del modello analitico 3D viene associata la relativa informazione del colore derivata da una o più immagini. Il dato cromatico aggiunge così informazione a quello spaziale ed ogni punto della nuvola di punti 3D *texturizzata* risulta descritto da 7 coordinate: tre di posizione nello spazio, una data dal vettore di orientamento e, infine, le tre relative al canale RGB.

A seconda delle applicazioni e dei requisiti, i dati 3D a cui associare il colore possono essere, quindi, sotto forma di triangoli, oppure rimanere semplici punti di una nuvola, consentendo una visualizzazione decisamente più rapida; le soluzioni di *rendering point-based* tuttavia non sono le più appropriate per output molto dettagliati e complessi.

Benché la fase di *texturing* possa essere eseguita, proiettando e assegnando le informazioni cromatiche, mediante una codifica *color-vertex*, una parametrizzazione *mesh* o una *texture* esterna, in ambito di computer grafica essa può anche sfruttare tecniche capaci di modificare graficamente la geometria 3D ricostruita (*mapping displacement*) o addirittura simulare le irregolarità della superficie senza alterarne la geometria (*bump mapping*, *normal mapping*, *parallax mapping*)¹³³.

Nella fase di *texture mapping* possono sorgere alcune problematiche causate essenzialmente da motivi quali:

1. le variazioni radiometriche delle immagini, le specularità della superficie e le impostazioni della fotocamera usata nel momento di *imaging*. Può succedere, come già anticipato, che si verifichino discontinuità radiometriche fra le immagini, poiché queste sono spesso esposte all'illuminazione presente al momento di acquisizione. Tale problema può essere risolto, oltre che con operazioni posteriori di *texture blending*, mediante le proprietà di riflettanza (BRDF) dell'oggetto, usando immagini *High Dynamic Range (HDR)*¹³⁴, posizionando *targets*, o sostituendo l'illuminazione di *imaging* con l'illuminazione adeguata al punto di vista di *rendering*;

2. le distorsioni geometriche dovute a procedure di orientamento non corrette;
3. le occlusioni provocate dall'ingombro di oggetti statici o in movimento – quali pedoni, auto, alberi, etc. – davanti agli oggetti che devono essere registrati 3D. Tale problema, presente soprattutto quando si rilevano oggetti e siti di grandi dimensioni, causa spesso una perdita di qualità o esiti irrealistici, ma può essere evitato nella fase di *pre-processing* delle immagini, ricorrendo ad esempio all'uso di maschere; etc.

Ottenere una visualizzazione dei modelli 3D maggiormente realistica e precisa costituisce l'esito dell'intero processo di rilievo, essa può essere considerata come l'unico prodotto di interesse per il mondo esterno poiché suo unico contatto con i dati tridimensionali. Oggi la capacità di interagire facilmente con un modello 3D sempre più complesso – quindi più completo ma anche difficile da gestire – sta diventando un problema crescente. Infatti le dimensioni del modello (sia dal punto di vista geometrico che per la struttura) stanno aumentando ad un ritmo più veloce rispetto ai progressi *hardware* e ciò limita le possibilità di una visualizzazione interattiva in tempo reale dei risultati 3D. Ricavare una rappresentazione tridimensionale capace di contenere le caratteristiche del reale, in modo affidabile e con un alto livello di definizione, aggiungendo sensazione visiva e apparenza cromatica ad *output* fotogrammetrici, dai contenuti colorimetrici precisi ed accurati, diviene una sfida più che mai attuale.

L'impiego di approcci di rilievo integrati, multi-risoluzione¹³⁵, oltre che di semplificazione ed ottimizzazione, in grado di favorire la gestione della crescente quantità e complessità dei dati, si stanno dimostrando una possibile soluzione.

3.6 Integrazione con la Computer Vision

Oggi quando si vuole affrontare l'applicazione del rilievo fotogrammetrico tridimensionale, specie nel campo dei Beni Culturali, è emergente la tendenza a ricercare soluzioni di documentazione che consentono qualità metrica e completezza d'informazione da una parte e, riduzione di costi e tempi dall'altra. L'attività di ricerca, avendo l'obiettivo di combinare sistemi di acquisizione 3D con processi

fotogrammetrici, ha spinto – e spinge – verso un maggiore confronto con altre discipline, ed in particolare con quelle legate al mondo virtuale.

Grazie ai recenti progressi tecnologici ed informatici, con lo sviluppo e l'implementazione di *hardware* e *software* dedicati, la raccolta dei dati metrici e colorimetrici necessari per una registrazione digitale completa, ha richiesto un altrettanto perfezionamento dei metodi di visione artificiale o *Computer Vision (CV)*. La tecnica fotogrammetrica, legata da sempre agli aspetti di misura, ha dovuto così integrarsi con approcci in cui tali aspetti risultano in parte trascurati, a favore di soluzioni automatiche in *real-time*¹³⁶. Difatti con il termine *Computer Vision* si indica quel particolare campo dell'informatica che dagli anni Ottanta, si è dedicato alla ricostruzione tridimensionale di oggetti attraverso l'automazione dei processi, partendo da un insieme di fotografie o da video multimediali¹³⁷. All'origine di tale approccio si trovano i progressi ottenuti nella sperimentazione del riconoscimento automatico di punti comuni all'interno di un gruppo di immagini (*Feature Detection*). Mentre i tentativi pionieristici di ricostruzione di una scena reale in tre dimensioni si basavano sull'estrazione di bordi, sulla struttura topologica di linee o su dati bidimensionali di natura analogica, si è giunti poi allo sviluppo di algoritmi sofisticati di calcolo che consentono di individuare lo stesso elemento su fotografie di orientamento a scale differenti¹³⁸. La ricerca nel campo della *Computer Vision* si è così occupata di sviluppare, in parallelo, le tecniche matematiche per recuperare la forma tridimensionale e l'aspetto degli oggetti dalle immagini.

Verso la fine degli anni Ottanta, infatti, grazie ai risultati della *Feature Detection* e contemporaneamente al diffondersi dei primi apparecchi fotografici digitali, l'attenzione si è concentrata soprattutto sulla realizzazione di un modello 3D che ricostruisse, a partire da una serie di fotogrammi ed in modo automatico, la realtà usando una nuvola di punti a bassa densità.

Tale tecnica, nota come *Structure from Motion (SfM)*, è andata via via sviluppando una ricostruzione proiettiva in grado di dedurre, per triangolazione, la posizione degli oggetti presenti nella scena reale, senza conoscere la calibrazione della camera e senza alcun ausilio da parte dell'operatore, ma ricavando allo stesso tempo i parametri di orientamento interno ed esterno delle singole fotografie

(posizione e orientamento del punto di scatto). Del resto, l'esigenza di ottenere risultati accurati in modo automatizzato, conservando la precisione finale – la completezza ed il livello di dettaglio tipici della procedura fotogrammetrica – ma riducendo l'intervento umano, ha richiesto che quest'ultima venisse combinata sempre più con gli algoritmi di *Computer Vision*¹³⁹.

L'impiego di un approccio di ottimizzazione globale, già usato in fotogrammetria e noto come metodo *bundle adjustment* (o a stelle proiettive), finalizzato a migliorare la procedura computazionale di ricostruzione geometrica 3D e di individuazione della posizione delle camere, ha consentito di eseguire 'la minimizzazione robusta non lineare degli errori di misurazione (ri-proiezione cioè proiezione inversa)'¹⁴⁰. A tale riguardo lo sforzo maggiore si è registrato nelle applicazioni terrestri, dove la diversità e la complessità del *network* di immagini acquisite¹⁴¹, oltre che all'indisponibilità di sensori per l'orientamento diretto, hanno reso il conseguimento dell'automazione un problema maggiore rispetto al campo della fotogrammetria aerea¹⁴². Non a caso i progressi della ricerca per produrre superfici 3D complete si focalizzarono attivamente sugli algoritmi per la ricostruzione densa (*dense stereo correspondence algorithms*) impiegando le corrispondenze calcolate fra più immagini (*multi-view stereo algorithms*)¹⁴³. Il limite della scarsa densità del modello 3D, ottenuto inizialmente, è stato così risolto di recente grazie allo sviluppo di nuovi algoritmi che sono alla base dei *software* di modellazione e resa basate sull'immagine, ossia di *Image-Based Modeling (IBM)*¹⁴⁴ and *Rendering (IBR)*¹⁴⁵.

L'area interdisciplinare di fotomodellazione diviene, in effetti, l'esito più significativo raggiunto dalla *Computer Vision* – in virtù della sua maggiore interazione con la *Computer Grafica* – poiché il nuovo *output* prodotto ricostruisce in modo dettagliato la scena mostrata nelle immagini originali¹⁴⁶. In tal modo se l'identificazione automatica dei punti omologhi – e quindi le fasi di orientamento e di accoppiamento (*matching*) – ha rappresentato un compito assai complicato, soprattutto nel contesto *close-range*, la definizione di nuovi applicativi di modellazione 3D, che sfruttano le tecniche fotogrammetriche integrate dai principi della CV, hanno permesso di stimare simultaneamente, da un *set* di corrispondenze (*features*) fra le immagini, i parametri di orientamento interno ed esterno e le coordi-

nate dei punti oggetto¹⁴⁷. Del resto tale integrazione può essere considerata una conseguenza fisiologica della convergenza di obiettivi che induce sia le tecniche di visione artificiale che quelle fotogrammetriche ad utilizzare immagini digitali per la realizzazione di modelli 3D. È infatti proprio grazie all'impiego degli algoritmi di *dense image matching*¹⁴⁸ che le strategie di orientamento, denominate appunto *Structure from Motion*, riescono a computare un set denso di corrispondenze fra le immagini.

3.7 Tecnica Structure from Motion

Oggi tutti i metodi di risoluzione della *Structure from Motion* si basano su metodologie che, capaci di orientare un numero anche molto elevato di fotogrammi senza bisogno di conoscere preliminarmente le caratteristiche della camera e del set di presa, prevedono la ricerca di punti omologhi da correlare nelle varie immagini.

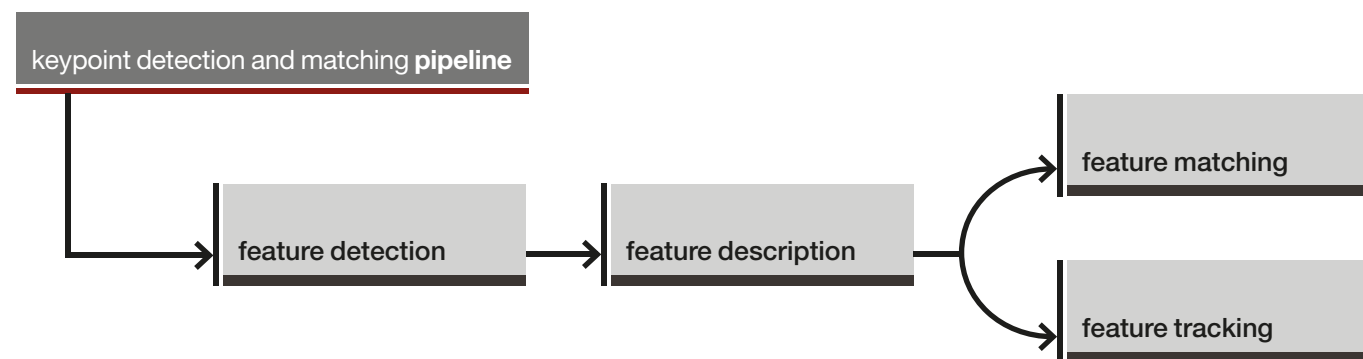
La prima fase corrisponde all'estrazione di una serie di punti chiave o di legame – *features* – all'interno della collezione di fotografie; questi serviranno per descrivere le corrispondenze fra le immagini e collegarle fra loro – *image matching* – e dovranno quindi essere ben riconoscibili e visibili nella maggior parte delle immagini ai fini di un abbinamento corretto. Infatti l'individuazione di tali punti 'notevoli' può risultare difficile dal momento in cui le varie fotografie di origine, di solito variano per illuminazione e scala, oltre che per orientamento.

A seconda dell'algoritmo utilizzato per estrarre i punti chiave – *feature detector* – vengono fornite alcune delle loro caratteristiche, riferite di solito alla loro posizione

(cioè le coordinate *pixel*) e, talvolta, alla loro area di copertura nell'immagine (approssimata ad un cerchio o ad un'ellisse).

Ai fini dell'analisi dei punti di legame – per determinare, quindi, come ciascuno di essi sia simile o differisca rispetto ad un altro – vengono poi calcolati i cosiddetti *feature descriptors* che ne sintetizzano le loro caratteristiche, come la direzione, l'orientamento, l'estensione ed il gradiente cromatico, in formato vettoriale. Applicati per ogni *keypoints* tali algoritmi assegnano una descrizione numerica all'area dell'immagine a cui il punto di legame è riferito, agendo come una sorta di 'impronta' – appunto – numerica che può essere utilizzata per differenziare le stesse *features* fra loro. In tale fase ogni regione intorno alla posizione di ciascun punto chiave rilevato viene convertita in un descrittore che, progettato per essere maggiormente robusto e stabile (invariante) rispetto alle trasformazioni fra le varie immagini fotografiche del blocco¹⁴⁹, può essere confrontato con gli altri descrittori.

Una volta individuati tutti i punti chiave nelle immagini, essi vengono confrontati ed accoppiati nella successiva fase di *matching*. I risultati degli algoritmi descrittivi vengono così incrociati¹⁵⁰ per riscontrare le effettive simmetrie, in modo da tracciare il movimento dei punti in comune all'interno della sequenza di fotogrammi. Dato che il numero delle corrispondenze corrette o sbagliate viene stimato grazie all'algoritmo di *feature matching*, al fine di risultati ottimali occorrono, quindi, strategie di stima robuste capaci di individuare i vari punti omologhi nelle immagini con una precisione maggiore e scartando gli eventuali errori¹⁵¹. Di conseguenza, mentre per quali corrispondenze siano da trasmettere alla fase successiva di elaborazione



vengono determinate dalle strategie di *matching*, si sviluppano algoritmi e strutture di dati per eseguire tali corrispondenze più rapidamente possibile¹⁵². Uno fra gli algoritmi più efficienti per queste tre fasi è

quello denominato *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT)¹⁵³ poiché esso – dimostrandosi abbastanza robusto e stabile rispetto alle variazioni di scala, rotazione, traslazione e parzialmente invariante nel caso di cambiamen-

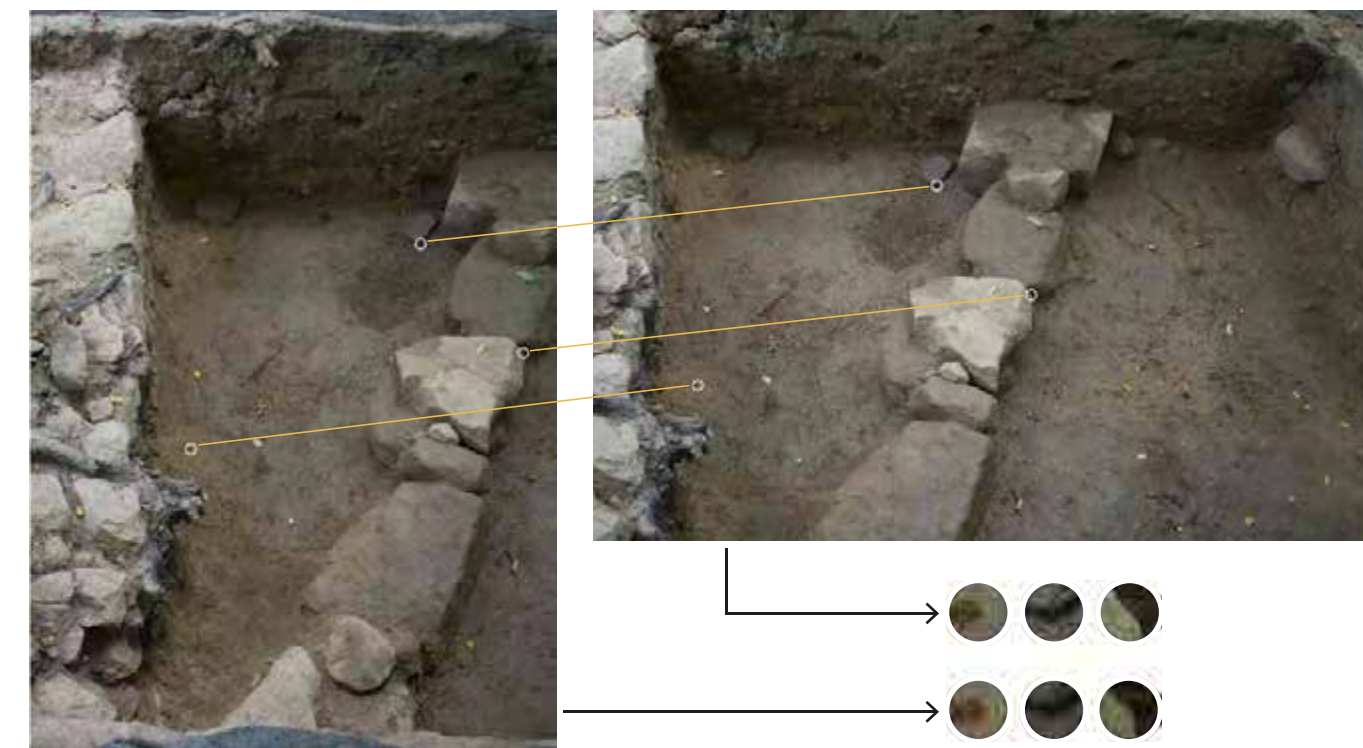


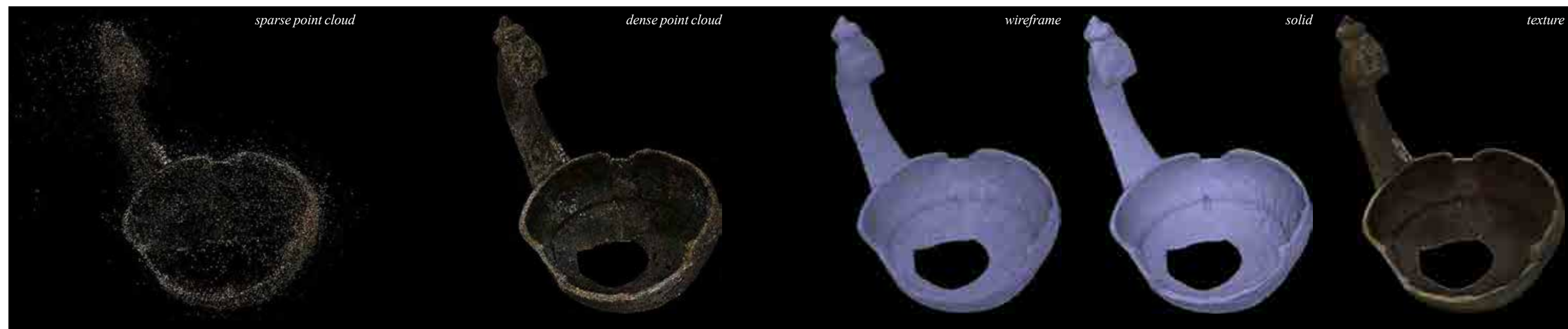
Fig. 21 – (nella pagina precedente) La pipeline di rilevamento (detection) dei keypoints, la determinazione delle loro corrispondenze (matching) nelle immagini può essere divisa in quattro fasi distinte. Dopo aver rilevato i keypoints (features) è necessario metterli in corrispondenza, cioè determinare quali features provengono da posizioni corrispondenti nelle differenti immagini. La fase di feature tracking è un'alternativa a quella di matching poiché, ricercando solo piccoli intorni per ciascuna feature rilevata, è più adatta per l'elaborazione video. (Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, ed. Springer, 2010).

Fig. 22 – (sopra) Durante l'estrazione delle patch da accoppiare, alcune di queste possono essere localizzate con una precisione maggiore rispetto ad altre. Le due immagini sono state scattate durante l'acquisizione fotografica svolta a Poggio Colla per il rilievo fotogrammetrico di un'area di scavo (PC45).

ti del contrasto di luce o del punto di vista¹⁵⁴ – riesce ad estrarre i punti omologhi dai vari fotogrammi, raggruppandoli allo scopo di fornire un 'riconoscitore di forme' per la *Computer Vision*.

Dunque – come ci dicono i fratelli Bezzi *et al.* – 'basandosi sul semplice principio per cui gli oggetti vicini al punto di osservazione si spostano nello spazio più velocemente rispetto agli elementi lontani, viene realizzata una prima ricostruzione tridimensionale della scena rappresentata, contenente anche l'informazione relativa alla posizione e all'orientamento della macchina fotografica'¹⁵⁵.

Individuate così le corrispondenze 'apparenti' fra le *features* e formato un primo tentativo di catalogazione delle omologie presenti sui vari fotogrammi, è possibile stimare una geometria di presa preliminare ed eliminare le corrispondenze sbagliate. Al termine delle stime, la geometria



individuata non verifica le condizioni reali dei fotogrammi, ma fornisce una geometria proiettivamente equivalente a quella reale¹⁵⁶.

Dopo il *matching* delle immagini, quindi, l'approccio SfM prevede la ricostruzione 3D del blocco fotogrammetrico e della scena reale, recuperando i necessari parametri interni ed esterni di orientamento della camera. Tale procedura di tipo incrementale – selezionata una coppia di immagini di partenza le altre sono aggiunte ciascuna in ordine al maggior numero di punti omologhi contenuti – può essere svolta anche quando i parametri di calibrazione della camera impiegata sono incogniti (*self-calibration*), poiché questi possono essere calcolati dalle corrispondenze già determinate¹⁵⁷. Partendo infatti dai punti di legame, mediante l'applicazione del *bundle adjustment* – aggiustamento progressivo del fascio di raggi che vengono proiettati sull'area dell'immagine¹⁵⁸ – in modo automatico viene calibrata la fotocamera (quindi il calcolo della lunghezza focale e del punto principale, IO) e viene individuata la posizione di scatto delle singole immagini (ovvero le coordinate dei centri di presa e rotazioni del fotogramma, EO). Ottenendo, quindi, le coordinate spaziali (x, y, z) per ciascun punto omologo, queste vengono materializzate in tre dimensioni in una nuvola di punti 'sparsa', ossia in un modello 3D a

bassa densità che costituisce la rappresentazione preliminare per il passaggio successivo di ricostruzione densa. La *sparse point cloud* viene infittita da una notevole quantità di punti per opera di algoritmi di *dense image matching*, i quali, partendo dai dati relativi alla posizione dei punti di legame (x, y, z), estendono l'analisi delle immagini alle loro aree prossimali per riconoscere ed estrarre la posizione degli elementi circostanti.

Il risultato sarà un modello tridimensionale – *dense points cloud* – composto da una nuvola densa di punti localizzati nello spazio e caratterizzati da un valore cromatico, ereditato dal colore dei *pixel*. Quindi *output* che potrà essere impiegato, analogamente alle nuvole di punti prodotte dai sensori ottici *range-based* (come gli scanner laser), per la generazione di un modello *mesh* a maglia triangolare, i cui vertici sono i medesimi punti che compongono la nuvola densa ricostruita dalle foto¹⁵⁹.

Le ulteriori operazioni possibili sul modello, dalla sua messa in scala mediante delle misure rilevate sull'oggetto, a quelle di *editing* volte ad ottimizzarne la struttura e a migliorarne la qualità, fino al *texture mapping* – che aggiunge alla geometria restituita le proprietà superficiali (come colore, finitura, grana, etc.) mediante l'estrazione di porzioni di immagini da riproiettare sulle *mesh* – rendono questo

Fig. 23 – Documentazione tridimensionale di un reperto etrusco proveniente da Poggio Civitate presso Murlo (Siena). Le varie fasi del processo Structure for Motion: dalla nuvola di punti sparsa (a sinistra) fino al modello con texture. Il processo di mappatura aggiunge ai dati geometrici del modello 3D le informazioni relative al colore della superficie dell'oggetto.

non solo una riproduzione digitale geometricamente e metricamente fedele all'oggetto rilevato, ma un suo autentico modello spaziale di foto 'solida'. D'altronde nella strategia *Structure from Motion* la fase di acquisizione delle immagini di base resta fondamentale, un momento cioè da eseguire con massima attenzione, considerando non solo che in generale ogni punto può essere collocato nello spazio 3D solo se visibile in almeno tre fotografie, ma che le stesse procedure di acquisizione cambiano a seconda della scena ritratta.

Nel momento in cui l'impiego dei versatili algoritmi di calcolo permette di applicare tale approccio a realtà assai diverse, per fattori di scala e per differenze ambientali, la metodologia di ripresa non sarà mai casuale ma dovrà essere ponderata prima di tutto in base al contesto e alle caratteristiche dell'oggetto, o della scena da registrare, senza

dimenticare i requisiti di *output* desiderati.

Se da un lato la tecnica SfM, riuscendo a collimare automaticamente un numero minimo di tre foto, costituisce una sorta di estensione del modello stereoscopico, dall'altro – a differenza di quest'ultimo – non esige inizialmente né di particolari vincoli di ripresa né di conoscere la posizione reciproca dei punti di vista. A differenza delle tecniche fotogrammetriche tradizionali, che richiedono l'impiego di camere metriche o calibrate, la strategia SfM può usare una fotocamera qualsiasi – di cui non è necessario conoscere alcun parametro – purché si rilevi una misurazione direttamente sull'oggetto o nell'ambiente ai fini del corretto dimensionamento del modello 3D ricostruito.

Durante la campagna di ripresa le fotografie vengono in genere acquisite 'a mano libera' e non su un asse fisso come accade, invece, per i modelli stereo. Basterà che il rilevatore-fotografo acquisisca un numero tale di foto che, girando intorno all'oggetto o al sito di interesse, riesca a catturare tutte le inquadrature necessarie per coprire e documentare la scena del rilievo. Nel caso di un reperto mobile o di una struttura osservabile da tutti i lati, per esempio, una buona regola è quella di effettuare uno scatto ogni 15 gradi intorno all'oggetto; mentre se il soggetto del rilievo è un elemento architettonico fissato ad una parete,

questo dovrà essere fotografato da diversi punti, lungo le direttrici orizzontali differenziate verticalmente, per evitare zone d'ombra all'interno del modello¹⁶⁰.

Non c'è, pertanto, un limite quantitativo nella raccolta dati, tuttavia un numero eccessivo di immagini fotografiche accresce in modo notevole i tempi di calcolo informatico, rallentando l'intero flusso di lavoro a vantaggio però della maggiore qualità di output. 'È buona norma – infatti – acquisire un elevato numero di scatti, soprattutto per quelle situazioni che andranno irrimediabilmente perse con il proseguire delle immagini' – come lo scavo di un contesto archeologico – poiché 'la selezione delle immagini migliori potrà essere comunque effettuata all'inizio della fase di *feature detection*'¹⁶¹.

Nel corso degli ultimi anni, in particolare, la realizzazione di modelli 3D da una collezione di immagini, o da una sequenza video, ha generato un'intesa attività di ricerca nella comunità di CG e CV, tale da condurre alla creazione di diversi strumenti avanzati – come un *software* di *Structure from Motion* – quali prototipi di ricerca prima nei laboratori, applicativi oggi disponibili per un ampio pubblico¹⁶². Questi, combinando le tecniche di SfM a quelle di *Image-Based Modeling and Rendering*, costituiscono 'un sistema interattivo di visualizzazione ed esplorazione di *set* di fotografie all'interno di una scena tridimensionale' in grado di permettere 'un'organizzazione automatica, su base geometrica, del materiale'¹⁶³. Strumenti dunque che sembrano particolarmente adatti alla documentazione archeologica.

Note

1. Cfr. L. De Luca, *La fotomodellazione architettonica*, op. cit., cap. 1, p. 25.
2. Deriva dal termine greco *phôs* – genit. *phôtôs* – 'luce', *gràmma* – che sta per *gràph-ma* – 'segno inciso, incavato' (ovvero qualcosa di disegnato o scritto) e *mètron* 'misura'. Pertanto etimologicamente fotogrammetria significa 'misurare graficamente per mezzo della luce'.
3. Fotografia e prospettiva si interpongono tra la nostra mente e l'oggetto della sua indagine determinando un analogo modo di vedere. 'La *camera obscura* ha fornito contemporaneamente il quadro prospettico, la Fotografia e il Diorama, le quali sono tutte e tre delle arti sceniche' (R. Barthes, *La camera chiara. Nota sulla fotografia*, ed. Einaudi, Torino, 1980, p. 32.). L'immagine rovesciata, generata attraverso il foro stenopeico nella camera oscura, configurandosi quale prodotto di un'arte – la fotografia appunto – che rimanda obbligatoriamente al comune denominatore della visione, esprime il *continuum* che la centralità dell'occhio ha rivestito nel rapporto tra il soggetto e la realtà.
4. In generale, questa percezione, che costituisce la cosiddetta 'fusione binoculare, si spiega dicendo che quando le due immagini si formano in punti o in zone fisiologicamente corrispondenti, nelle due retine si realizza (grazie all'educazione inconsapevole del cervello) un collegamento tra le due fibre che trasmettono l'influsso luminoso, sicché il punto osservato appare unico'. (Cfr. C. Cundari, *Fotogrammetria architettonica*, ed. Kappa, Roma, 1983, p. 24).
5. Punti che a loro volta risulteranno determinati per intersezione di due rette proiettanti da centri di proiezioni distinti (Cfr. *Ibidem*, p. 29).
6. Cfr. B. Aterini, (2009) *Introduzione ai metodi di rappresentazione della Geometria Descrittiva*, Firenze, ed. Alinea, 2009, cap. 7.
7. Aristotele (Stagira, 384-383 a.C. – Calcide, 322 a.C.) fu un filosofo, scienziato e logico greco.
8. Abu Ali Mohammed ibn Al Hasan ibn Al Haytam (Bassora, 965 ca. – Il Cairo, 1039), conosciuto come *Al-Hazen* e chiamato *al-Başrî* (di Bassora) o *al-Miṣrî* (l'egiziano), fu uno dei maggiori scienziati del mondo islamico. Medico, filosofo, matematico, fisico e astronomo, autore – fra l'altro – dei commentari delle opere di Euclide, di Tolomeo e Apollonio, fu l'iniziatore dell'ottica moderna. Le sue ricerche sul capovolgimento dell'immagi-

ne all'interno del globo oculare permisero allo scienziato persiano di sviluppare il primo studio sulla camera oscura. Infatti, con notevole anticipazione ed esattezza, Al-Hazen descrisse il meccanismo di capovolgimento dell'immagine che, attraversando un foro, si formava sul fondo della camera. La sua principale opera di ottica, il *Kitāb al-manāẓir*, fu tradotta in latino nel XII secolo con il titolo *De aspectibus* e fu edita solo nel 1572 a Basilea insieme con il trattato di Vitellione, come *Opticae Thesaurum Al-Hazeni Arabi Libri VII*. L'opera prospettica di Al-Hazen fu ampiamente studiata e citata da filosofi, scienziati e matematici del mondo latino, come Peckham e Witelo, ma anche successivamente da Lorenzo Ghiberti e dallo stesso Leonardo Da Vinci (Cfr. A. De Rosa, A. Sgrosso, A. Giordano, *La Geometria nell'Immagine*, vol. 1, *Dall'Antichità al Medio Evo*, ed. UTET, 2000, p. 139).

9. Leon Battista Alberti (Genova, 1404 – Roma, 1472) fu uno dei maggiori personaggi poliedrici del Rinascimento della seconda generazione di umanisti. Architetto, matematico, linguista, filosofo, musicista, archeologo, oltre che crittografo, nel *De Pictura* fornì la prima definizione della prospettiva scientifica.

10. Leonardo Da Vinci (Vinci, 1452 – Amboise, 1519) fu pittore, ingegnere e scienziato, occupandosi anche di architettura, scultura, trattatistica, scenografia, anatomia, etc. Leonardo nel suo *Trattato della pittura* (1490 ca.) definì la prospettiva come 'nient'altro che vedere un oggetto dietro un vetro piano e ben trasparente, la cui superficie contiene tutte le cose che sono dietro: esse possono essere riportate al punto dell'occhio tramite delle piramidi, e le piramidi tagliano il vetro mensionato'.

11. Albrecht Dürer (Norimberga, 1471 – Norimberga, 1528) fu un pittore, incisore, matematico e trattatista fra i più importanti del periodo rinascimentale in Germania. Fabbricò dispositivi per la visione prospettica, il reticolo e il portello, quali evoluzioni del *velum*, un congegno costruito dall'Alberti e perfezionato da Leonardo. Fra i suoi trattati, si ricordano *Underweysung der Messung mit dem zyrckel und richtscheyt* (Insegnamento della misura con l'aiuto del compasso e della riga) e l'*Institutionem geometricarum Libri quatuor*, editi nel 1525. In quest'ultimo Dürer espose alcune costruzioni di poligoni regolari assieme alle tecniche di rappresentazione prospettica di molti poliedri e il loro sviluppo su un piano poiché 'per lui la geometria è il fondamento di tutta la pittura... L'arte della misura (*Die Kunst der Messung*) è un custode straordinario contro l'errore e comporta un giudizio più sicuro.' Nell'ultima parte del primo trattato pubblicato a Norimberga, invece, si occupa di prospettiva (Cfr.

A. De Rosa, A. Sgrosso, A. Giordano, *La Geometria nell'Immagine*, vol. 2, *Rinascimento e Barocco*, ed. UTET, 2000, p. 182-183).

12. Cfr. T. J. Blachut, R. Burkhardt, *Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments*, ASPRS Science and Engineering, USA 1991, p. 1; A. De Rosa, A. Sgrosso, A. Giordano, *La Geometria nell'Immagine*, vol. 1, op. cit., p. 195).

13. Il *De pictura* propone una rappresentazione della prospettiva da un punto di fuga centrale per simulare la visione umana, formalizzando il passaggio dalla *perspectiva naturalis* a quella *artificialis*. Filippo Brunelleschi (Firenze, 1377 – Firenze, 1466) pensando all'*intersegiante* della piramide visiva, introduce un procedimento grafico-geometrico attraverso cui riprodurre scientificamente una porzione osservata di spazio reale: costruisce due tavolette (una raffigurante il Battistero di San Giovanni e l'altra Palazzo della Signoria a Firenze) con un foro al centro corrispondente al punto di vista; l'osservatore mira, attraverso il foro, uno specchio che, posto di fronte alla tavoletta, ne riflette quanto in esse disegnato, sperimentando le leggi della prospettiva e dimostrando l'esistenza di un punto di fuga. (Cfr. L. Vagnetti, *De naturali et artificiali perspectiva: bibliografia ragionata delle fonti teoriche e della storia della prospettiva: contributo alla formazione della conoscenza di un'idea razionale, nei suoi sviluppi da Euclide a Gaspard Monge*, ed. Libreria Editrice Fiorentina, Firenze, 1979, vol. 2, pp. 195-199).

14. L'idea di rilevare topograficamente il terreno servendosi della fotografia nacque non appena venne in uso la fotografia. Il primo a occuparsi di questo problema fu il fisico francese François Arago (Estagel, 1786 – Parigi, 1853).

15. Filippo Brunelleschi, per esteso Filippo di ser Brunellesco Lapi (Firenze, 1377 – Firenze, 1446), architetto, ingegnere, scultore, orafo e scenografo italiano del Rinascimento.

16. Prof. Ing. Mario Fondelli (Firenze, 1924)

17. M. Fondelli (1977), *I fondamenti della fotogrammetria nella prima esperienza prospettica di Filippo Brunelleschi*, in *Bollettino degli Ingegneri della Toscana XXV*, 11, 1977, pp. 18-21.

18. Cosimo Bartoli (1503-1572), accademico, letterato e uomo di corte, fu il principale interprete e traduttore in lingua italiana delle opere di Leon Battista Alberti.

19. 'Del modo di misurare le distanze, le superfici, i corpi, le province, le prospettive et tutte le altre cose terrene che possono occorrere a gli huomini, secondo le vere regole d'Euclide ed de gli altri più lodati scrittori' (Venezia, 1564)

20. Gaspard Monge, conte di Pelusium (Beaune, 1746 – Parigi,

1818) matematico e disegnatore è stato il codificatore della geometria descrittiva. Professore alla scuola di Mézières (1768), ricoprì poi la cattedra di matematica all'Università di Parigi e, successivamente, insegnò alla Scuola Politecnica di Parigi geometria descrittiva.

21. Guidobaldo Del Monte (Pesaro 1545 - Mombaroccio 1607). Cfr. B. Aterini, *Guidobaldo del Monte (1545-1607)*, in M. Cigola, 'Distinguished Figures in Descriptive Geometry and Its Applications for Mechanism Science: From the Middle Ages to the 17th Century', serie History of Mechanism and Machine Science, ed. Springer, pp. 153-180.

22. *Perspectiva libri sex* (Pesaro 1600).

23. Simon Stevin (1548 – 1620) o Simone di Bruges, ingegnere, fisico e matematico fiammingo.

24. *De Perspectivis*, Leyda 1605.

25. Jean-Louis Vaulezard, matematico francese del XVII secolo, è stato uno dei primi traduttori delle opere di Franciscus Vieta, nome latinizzato del matematico francese François Viète (Fontenay, 1540 – Parigi, 1603) il quale aveva apportato notevoli contributi all'algebra. Vaulezard ha pubblicato tra il 1630 e il 1644 trattati sulla prospettiva, l'anamorfose cilindrica e conica, la gnomonica.

26. Girard Desargues (Lione 1591 – 1661), artista e matematico francese. L'origine della geometria proiettiva è legata alle sue ricerche orientate a cercare una via alternativa per il disegno in prospettiva, che generalizzasse l'uso dei punti di fuga ed includesse il caso in cui questi sono infinitamente lontani. Egli inquadrò la geometria euclidea all'interno di un sistema geometrico più generale.

27. Johann Heinrich Lambert (Mulhouse 1728 – Berlino 1777), matematico, fisico, filosofo tedesco di origine francese. In campo matematico analizza il quinto postulato di Euclide (che lo colloca tra gli immediati precursori delle geometrie non euclidee) e fornisce notevoli contributi alla teoria dei numeri. Nel campo della cartografia, prende nome da lui una proiezione azimutale equivalente, usata per rappresentare vaste porzioni del globo. Dei suoi studi di fisica, particolarmente importanti sono quelli di ottica, raccolti nell'opera *Photometria* (1760), che lo portarono alla formulazione della cosiddetta legge del coseno, alla formulazione d'importanti leggi sull'assorbimento della luce (*legge di Bouguer-Lambert e legge di Lambert e Beer*: nel campo della spettroscopia ottica) e alla creazione di uno dei primi diagrammi cromatici (*diagramma cromatico piramidale di Lambert*). Si occupò di teoria dei numeri, di equazioni algebriche, di serie; ri-

conobbe, come caratteristica dei numeri razionali, la sviluppabilità in decimali periodici; dimostrò l'irrazionalità del rapporto π della lunghezza della circonferenza al diametro; introdusse l'uso delle funzioni iperboliche nei problemi trigonometrici; sviluppò per primo una geometria della sola riga; recò contributi personali alla cartografia e alla prospettiva.

28. Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, 1623 – Parigi, 1662) matematico, fisico, filosofo e teologo francese.

29. Jean-Victor Poncelet (Metz, 1788 – Parigi, 1867) matematico e ingegnere francese, ha portato molti contributi allo sviluppo della geometria proiettiva. Nel 1822 pubblicò il '*Traité des propriétés projectives des figures*', opera nella quale è identificata la nascita della moderna Geometria proiettiva. Poncelet dimostrò che il birapporto è invariante nelle proiezioni e le proprietà con questa caratteristica si dicono *proprietà proiettive*. Ebbe il merito anche di riproporre organicamente la nozione di punto all'infinito, avvicinandosi alle idee di Desargues.

30. Felix Christian Klein (Düsseldorf, 1849 – Göttinga, 1925) matematico tedesco è noto per i suoi contributi alla geometria non euclidea, ai collegamenti tra geometria e teoria dei gruppi e per alcuni risultati sulla teoria delle funzioni.

31. Cfr. De Luca, *La fotomodellazione architettonica*, op. cit., p. 23.

32. Johannes von Kepler (Weil der Stadt, 1571 – Ratisbona, 1630) detto anche Giovanni Keplero, astronomo, astrologo, matematico musicista e teologo evangelico tedesco, scoprì empiricamente le leggi che regolano il movimento dei pianeti.

33. La stereoscopia (raramente detta anche stereofotografia o stereografia) è una tecnica di realizzazione e visione d'immagini, disegni, fotografie e filmati, atta a trasmettere un'illusione di tridimensionalità, analoga a quella generata dalla visione binoculare del sistema visivo umano.

34. John Napier, noto come Giovanni Nepero o semplicemente Nepero (Merchiston Castle, 1550 – Edimburgo, 1617), matematico, astronomo e fisico scozzese, celebre per l'introduzione del logaritmo naturale, dei bastoncini (o ossi) di Nepero e anche per aver sostenuto l'uso delle frazioni decimali e del punto come separatore decimale.

35. Sir Isaac Newton (Woolsthorpe-by-Colsterworth, 1642 – Londra, 1727) matematico, fisico, filosofo naturale, astronomo, teologo e alchimista inglese.

36. Gottfried Wilhelm von Leibniz (Lipsia, 1646 – Hannover, 1716) matematico, filosofo, scienziato, logico, glottoteta, diplomatico, giurista, storico; ha introdotto il termine 'funzione' che

egli usò per individuare le proprietà di una curva, tra cui l'andamento, la pendenza e la perpendicolare in un punto, la corda. A Leibniz, assieme a Isaac Newton, vengono generalmente attribuiti l'introduzione e i primi sviluppi del calcolo infinitesimale, in particolare il concetto di integrale. Fondamentale anche nella definizione di differenziale, Leibniz riorganizzò la matematica del '600 e non solo, tanto da essere considerato tra i più grandi matematici di tutti i tempi. È considerato il precursore dell'informatica, della neuroinformatica e del calcolo automatico; nel 1673 Leibniz presentò alla *Royal Society* di Londra il progetto della prima 'calcolatrice meccanica' in grado di eseguire moltiplicazioni e divisioni. Provò a costruire una calcolatrice che utilizzava il sistema numerico binario, peraltro già introdotto da Juan Caramuel. La macchina funzionava con delle biglie. La presenza o meno di una biglia in una posizione determinava il valore 1 o 0. Anche questa idea non ebbe un seguito immediato e si dovette attendere George Boole (Lincoln, 1815 – Ballintemple, 1864) considerato il fondatore della logica matematica, e lo sviluppo dei calcolatori elettronici perché venisse ripresa e sviluppata. Intorno al 1670 scoprì il calcolo infinitesimale.

37. François Jean Dominique Arago (Estagel, 1786 – Parigi, 1853) matematico, fisico, astronomo e politico francese, si interessò allo studio della pressione e alla velocità del suono; studiò il magnetismo. Nel 1830, eletto alla camera dei deputati del distretto dei Pirenei orientali, propose un contributo economico per l'invenzione di Louis Daguerre, la dagherrotipia.

38. Joseph Nicéphore Niépce (Chalon-sur-Saone, 1765 – Saint-Loup-de-Vareennes, 1833) fotografo e ricercatore francese, fin dal 1797 si occupa di camera oscura e fenomeni della luce. L'interesse per la produzione d'immagini senza l'intervento dell'uomo gli viene dalla litografia. Nel 1827, sperimentando tecniche diverse, ottiene la prima immagine disegnata dalla luce; due anni dopo fonda un'associazione, per il perfezionamento dei materiali fotosensibili, con Daguerre che continuerà da solo le ricerche arrivando al dagherrotipo.

39. Louis-Jacques-Mandé Daguerre (Cormeilles-en-Parisis, 1787 – Bry-sur-Marne, 1851) artista, chimico e fisico francese è universalmente riconosciuto come l'inventore del processo fotografico chiamato 'dagherrotipo'. Esso forniva un'unica copia, non riproducibile, su supporto in argento o in rame argentato sensibilizzato, con una lunga esposizione in camera oscura mediante esposizione a vapori di sodio.

40. Aimé Laussedat (Moulins 1819 - Parigi 1907), ufficiale del genio francese fu professore di astronomia e geodesia presso la

Scuola politecnica di Parigi e dal 1856 e 1880 ne divenne il direttore. Riconosciuto come 'il padre della fotogrammetria' Laussedat, negli anni 1859-61, presentò i primi esperimenti fotogrammetrici discretamente riusciti. (Cfr. T. J. Blachut, R. Burkhardt, *Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments*, ASPRS Science and Engineering, USA 1991, p. 1).

41. William Hyde Wollaston (East Dereham, 1766 – Chislehurst, 1828) chimico e fisico inglese, noto per aver scoperto il palladio ed il rodio, si interessò anche di ottica. Inventò la Camera lucida (1807) cioè un dispositivo ottico utilizzato dagli artisti come ausilio per il disegno.

42. Guido Hauck (Heilbronn, 1845 – Berlino, 1905) nel 1833 pubblica '*Construction der perspective und Photogrammetrie*' dimostrando, tra l'altro, l'esistenza di un legame proiettivo fra i due fasci di rette proiettanti punti corrispondenti in due immagini distinte di uno stesso corpo dai punti appartenenti ai due quadri ed alla congiungente i due centri di proiezione.

43. Sebastian Finsterwalder (Rosenheim, 1862 - Monaco di Baviera, 1951) matematico e geometra bavarese, professore della Università Tecnica di Monaco di Baviera.

Ha sviluppato uno dei primi metodi di ricostruzione di oggetti tridimensionali da immagini fotografiche di misura ma, allo stesso tempo, è stato anche un pioniere nel rilevamento geodetico in montagna, in particolare attraverso la sua ricognizione aerea dal pallone.

44. Gino Loria (Mantova, 1862 – Genova, 1954), matematico.

45. Francesco Sevrè (Arezzo, 1879 – Roma, 1961), matematico, professore di geometria proiettiva e descrittiva (1904). A lui si devono sostanziali contributi nel campo della geometria algebrica, con lo sviluppo della geometria sopra una superficie e su varietà di dimensione superiore; ha dato vita alla teoria della base, alla teoria delle funzioni quasi abeliane, alla teoria delle corrispondenze algebriche. Importanti contributi ha portato anche nel campo della geometria differenziale, dell'analisi matematica, della critica dei principi della geometria e della fisica.

46. Annibale Comessatti, (Udine, 1886 – Padova, 1945) matematico, discepolo di Severi, ha dedicato gran parte della sua attività scientifica alla geometria algebrica, con importanti ricerche sull'impiego promiscuo di procedimenti gruppalari, analitici, topologici ed algebrico-geometrici, ha anche dedicato vari lavori alla revisione dei principi logici della geometria proiettiva.

47. Sir Charles Wheatstone (Gloucester, 1802 – Parigi, 1875) fisico e inventore britannico.

48. Ernst Karl Abbe (Eisenach, 1840 – Jena, 1905) ottico, fisico,

astronomo e imprenditore tedesco, fu professore di fisica all'Università di Jena e, dal 1878, anche direttore dell'osservatorio astronomico della città tedesca. I suoi studi, rivolti prevalentemente all'ottica, gli fecero conoscere nel 1866 Carl Zeiss, a cui si associò nel 1875, assumendo la dirigenza della società di vetri ottici (sia per filtri sia per lenti) alla morte di quest'ultimo. Si devono a lui molti progressi nell'ottica strumentale; inventò importanti dispositivi che perfezionarono l'uso del microscopio, fra cui il 'condensatore di Abbe' e il 'prisma di Abbe' (adoperato come 'camera chiara'). Si dedicò al perfezionamento delle lenti e degli apparecchi ottici (come l'oculare ortoscopico). Inventò un rifrattometro (rifrattometro di Abbe).

49. Franz Stolze (Berlino, 1836 – 1910).

50. Carl Pulfrich (Burscheid, 1858 – Timmendorfer Strand, 1927) fisico e ottico tedesco. È noto per la sua attività di ricerca svolta nel periodo in cui lavorò per la Carl Zeiss a Iena intorno al 1880 e per aver documentato l'effetto Pulfrich, fenomeno psico-ottico che può essere utilizzato per creare un effetto 3D. Sua anche l'invenzione dello stereotelemetro, utilizzato nella seconda guerra mondiale dalla Regia Marina.

51. Henry Georges Fourcade (Bordeaux, 1865 – Sudafrica, 1948), ingegnere forestale, pioniere della fotogrammetria.

52. Eduard Dolezal (Moravia, 1862 - Baden, 1955) geometra austriaco studioso di matematica, fisica e geometria descrittiva, nel 1910 ha fondato la Società Internazionale di Fotogrammetria.

53. Albrecht Meydenbauer (Tholey Ottweiler, 1834 – Godesberg, 1921) ingegnere tedesco. Dal 1903 ha cominciato ad utilizzare il termine *fotogrammetria* per individuare l'insieme dei processi di utilizzazione delle prospettive fotografiche centrali nella formazione di cartografie topografiche e nella documentazione architettonica. Per le specifiche applicazioni la metodologia prende il nome di *fotogrammetria terrestre*, quando le prese vengono effettuate alla superficie del suolo, e *fotogrammetria aerea*, quando vengono effettuate da piattaforma spaziale aerea.

54. Carl Friedrich Koppe, (Vestfalia, 1844 – Colonia 1910) ingegnere, dal 1872 al 1875 effettuò il tracciamento del tunnel del San Gottardo e delle gallerie elicoidali di accesso, misurazioni di precisione e rilevamenti altimetrici. In seguito lavorò a Zurigo per la realizzazione di strumenti di precisione applicati alla fisica (1876-79) fu autore di pubblicazioni scientifiche sugli strumenti e sulla fotogrammetria.

55. Cfr. ISPRS Archives 1980, XIII Congress, 'Proceedings and Results', Commission Simposia, Amburgo, 1980 (<http://www.isprs.org/publications/archives.aspx>).

56. Ignazio Porro, nome completo Paolo Ignazio Pietro Porro (Pinerolo, 1801 – Milano, 1875) ottico e topografo italiano. Fu maggiore del Genio militare del Regno di Sardegna; portò molti contributi all'ottica e alla topografia (celerimensura). Intorno al 1850 inventò il sistema di prismi che è utilizzato nella costruzione dei binocoli. Fu impegnato nel rilievo topografico del territorio e partecipò alla fondazione della Tecnomasio e nel 1865 fondò la Filotecnica, la quale si sviluppò sotto la guida del suo allievo Angelo Salmoiraghi, diventando Filotecnica-Salmoiraghi.

57. Pio Paganini, ingegnere e geografo italiano (Milano, 1848 – Firenze, 1916). Ammesso nel 1864 alla Scuola di Marina, in qualità di ufficiale di Stato Maggiore partecipò alla battaglia di Lissa. Entrato nell'Istituto Geografico Militare, dove partecipò attivamente alle operazioni di triangolazione per la formazione della rete geodetica italiana, nel 1878, ebbe l'incarico di approfondire gli studi sulla fotografia applicata alla topografia iniziati da Ignazio Porro e da Michele Mauri; realizzò il primo fototeodolite, stabilendo i metodi di rilievo della fotogrammetria terrestre, che avrebbero soppiantato l'uso della tavoletta pretoriana nel rilievo topografico di zone impervie e inaccessibili. Le prime esperienze furono condotte sulle Alpi Apuane e consentirono di realizzare nel 1878 la prima carta topografica 1:25000. A seguito di ampie critiche avanzate dagli Inglesi circa la validità del metodo, l'anno successivo furono effettuate riprese fotografiche della Serra dell'Argentera nelle Alpi Marittime e nel 1880-85 del Gran Paradiso nelle Alpi Graie. Il metodo di Paganini ebbe il suo riconoscimento internazionale nel 1884 a tal punto che Canadesi e Russi lo utilizzarono nel rilievo delle Montagne Rocciose e nel Caucaso.

58. Eduard von Orel (Miramare-Trieste, 1877 – Bolzano, 1941) figlio dell'ufficiale della Marina austriaca Eduard von Orel (Neutitschen, 1841 – Miramare-Trieste, 1892) esploratore polare ed amministratore del Castello di Miramare. Eduard von Orel junior, cadetto di fanteria a Trieste, chiese di essere assegnato al 'K.u.K. Militärgeographisches Institut' di Vienna, il più famoso del mondo (1901). Qui nel 1905, ormai tenente, iniziò ad interessarsi di fotogrammetria, approfondendo le necessarie nozioni di ottica, meccanica e chimica. Diventò così un esperto topografo tanto da inventare, nel 1907, lo 'stereoautografo', uno strumento indispensabile per la nascente fotogrammetria, capostipite dei 'restitutori' fotogrammetrici, in seguito brevettato dalla Zeiss. Il dispositivo era costituito da un tavolo da disegno provvisto di righe e regoli mobili, connessi con uno stereocomparatore, sul

quale le lastre erano disposte su di un piano all'incirca verticale. (Cfr. A. Selvini, *Edoardo De Orel: la fotogrammetria diventa adulta*, in 'GEOmedia', vol. 17, n. 4, 2013).

59. Lo 'stereoautografo', apparecchio automatico di restituzione fotogrammetrica, costruito per la prima volta da E. De Orel nel 1908 è il capostipite di una serie di apparecchi restitutori automatici di tipo analogico. Risulta dall'accoppiamento di uno stereocomparatore con un cartografo mediante l'utilizzazione di un meccanismo che trasmette a una punta scrivente i movimenti che si impongono allo stereocomparatore per collimare un punto dello stereogramma; elimina ogni calcolo e consente anche di ottenere direttamente piani a curve di livello del terreno fotografato senza ricorrere alla trasformazione dei piani quotati.

60. L'alidada è un regolo girevole proprio del goniometro e di altri strumenti di misurazione, che serve per calcolare le misure angolari.

61. Umberto Nistri (Roma, 1895 – ivi 1962), pioniere della tecnica della fotogrammetria, conseguì vari brevetti (sin dal 1919) e costruì numerosi apparecchi per il rilevamento e la restituzione fotogrammetrica. Nel 1920 fondò la 'Società anonima rilevamenti aerofotogrammetrici' che, nel 1924, divenne la società Ottico-meccanica italiana (OMI).

62. Ermenegildo Santoni (Calci-Pisa, 1896 – Firenze, 1970) ingegnere ed inventore, padre, pioniere e precursore della fotogrammetria aerea. Nel 1915 servì come aiutante di squadra tacheometrica per rilevamento di mappe parcellari per l'Amministrazione del Catasto e venne, nello stesso anno, chiamato alle armi. Frequentò il Corso di Allievi Ufficiali di Complemento del Genio Militare a Torino nel 1916. Dopo un anno di servizio in zona di operazioni per una Compagnia del Genio minatori, fece richiesta d'essere trasferito in Aviazione ove continuò il servizio di guerra fino a fine 1918 col grado di Tenente osservatore d'aeroplano. Si congedò nel 1920, dopo aver seguito la realizzazione del suo 'intervallometro' presso lo Stabilimento di Costruzioni Aeronautiche in Roma per l'Aviazione Militare. Nel 1924 iniziò la sua collaborazione per l'attività aerofotogrammetrica con l'Istituto Geografico Militare a Firenze che durerà fino al 1940. Dapprima in veste di Ufficiale di Complemento richiamato in servizio, poi come esperto in servizio straordinario. Durante tale servizio venne promosso al grado militare di Capitano per anzianità di servizio e, poco tempo dopo, al grado di Maggiore per meriti eccezionali. Nel periodo di lavoro per conto dell'Istituto Geografico Militare, Santoni ebbe modo di progettare e realizzare molti strumenti tra cui il 'fotogoniometro' ed il

'ricercatore-triangolatore' (1925-29); il primo 'fototeodolite' (1930) sperimentato durante una spedizione in una catena montuosa dell'Asia; i 'fototeodoliti-restitutori balistici' (1932) per la Marina Militare ed utilizzati fino al 1943; il 'periscopio solare' (1925-26); lo 'stereocartografo' modello I (1925-26); lo 'stereocartografo' modello II (1928-29); lo 'stereocartografo' Galileo-Santoni modello III (1933) lo 'stereosimplex' Galileo-Santoni (1934). Nel 1938 presentò a Roma, al V Congresso della Società Internazionale di Fotogrammetria, i suoi esperimenti di aereotriangolazione solare analogica svolti in Libia (1935) ed in Italia (1938). Nel 1940 chiese ed ottenne di lasciare il servizio presso l'I.G.M. per prestare la sua opera presso le Officine Galileo di Firenze che divennero così concessionario dei brevetti e progettista degli strumenti del Santoni. Tale rapporto continuò fino alla sua scomparsa nel 1970. Alcune delle sue opere, durante questo trentennio, furono lo *stereosimplex* Galileo-Santoni in vari modelli; il periscopio solare modello III (1953); il goniometro solare Galileo-Santoni modello III ed il calcolatore solare Galileo-Santoni (1953); lo stereocartografo modello V (1962); il mono e stereocomparatore Galileo-Santoni (1968). Santoni ricevette anche diversi incarichi al di fuori del campo aerofotogrammetrico. Nel 1943, per conto dell'IGM, studiò uno speciale determinatore astronomico ed un registratore automatico di rotta. Per le Officine Galileo studiò e curò il progetto di un nuovo teodolite ad 1" ed un tacheometro ad 1". Interessato allo sviluppo dell'aereotriangolazione spaziale analogica ed analitica, il Santoni seguì tutti gli esperimenti in campo operativo compiuti sul territorio nazionale sia dall'I.G.M., che dall'E.I.R.A.. Anche la Società Internazionale di Fotogrammetria e l'*Organisation Européenne d'Etudes Photogrammétriques Experimentales* si avvalsero dei suoi consigli. Tra il 1958 e il 1960 seguì e curò direttamente un esperimento di triangolazione solare compiuto negli Stati Uniti d'America.

63. Gottfried Konecny (Troppau, 1930).

64. Sebastian Finsterwalder (Rosenheim, 1862 – 1951) matematico tedesco e glaciologo. È conosciuto come il "padre della fotogrammetria del ghiacciaio", avendo studiato tramite il rilevamento fotogrammetrico alcuni ghiacciai alpini.

65. Theodor Scheimpflug (1865 – 1911) capitano dell'esercito austriaco, ha elaborato un metodo sistematico per la correzione della distorsione prospettica nelle fotografie aeree.

66. Otto Heinrich Franz Anton Gruber, dal 1915 Ritter von Gruber (Salisburgo, 1884 – Jena, 1942) geometra tedesco e pioniere della fotogrammetria. Ha analizzato le fotografie aeree della

regione artica scattate in volo dal dirigibile Zeppelin nel 1931 riproducendo accurate mappe di queste zone. Le sue lezioni nei corsi di Fotogrammetria a Jena, pubblicate la prima volta nel 1930 (con le ristampe inglesi pubblicate nel 1942), fornirono concetti teorici pionieristici sulle formule differenziali delle relazioni proiettive tra i piani.

67. Willem Schermerhorn (1894 – 1977) olandese, professore a Delft, nel 1932 applicò le sue teorie nelle terre inesplorate delle Indie Orientali. È stato anche l'iniziatore della rivista dell'ISP 'Photogrammetria'. Primo Ministro dei Paesi Bassi post seconda Guerra Mondiale; fondatore (1950) dell' 'International Training Center' (ITC) per la ricognizione aerea a Delft.

68. Reinhard Hugerhoff (Sassonia, 1882 – Dresda, 1941) geodetico, docente di matematica, topografia, meteorologia, fotogrammetria presso l'Università Tecnica (TH) di Dresda. Durante la prima guerra mondiale ha promosso l'identificazione di punti di riferimento e documenti di pianificazione da immagini fotografiche di terra e poi aeree. Ha avuto un ruolo importante nella creazione di apparati fotogrammetrici e geodetiche degli anni 1920-31. Dal 1931 è stato anche un socio ricercatore della società Carl Zeiss Jena.

69. Heinrich Wild (Mitlodi-Glarus, 1877 – Baden, 1951) inventore svizzero,

70. Bertil Hallert (1910 – 1971) docente al *Swedish Royal Institute Technical* di Stoccolma ha condotto importanti studi di fotogrammetria anche in America (1953-54).

71. Earl Church (1890 – 1956) nel 1930 ha pubblicato 19 articoli sulla fotogrammetria computazionale (*computational photogrammetry*), dopo che sotto la sua direzione della *Syracuse University* era nato, nel 1929, il primo *American Institute of Photogrammetry*.

72. Nel 1972 viene lanciato dagli USA il primo satellite della serie ERST, (Earth Resources Technology Satellite), meglio noto come LANDSAT. I suoi rilievi di qualunque parte del globo sono disponibili a chiunque.

73. Il limite dei 300 m. costituisce anche la delimitazione della quota di sicurezza per le riprese da aeromobile (Cfr. M. Fondelli, *Trattato di Fotogrammetria urbana e architettonica*, ed. Laterza, Bari, 1992).

74. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 181.

75. 'Il mondo ora contiene più fotografie che mattoni e sono, sorprendentemente, tutte diverse' celebre citazione del fotografo

e storico dell'arte John Szarkowski (Ashland, 1925 – Pittsfield, 2007). È stato il direttore della fotografia al Museum of Modern Art (MoMA) di New York dal 1962 al 1991.

76. Entrambi i sensori, CCD (*Charged Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), sono dispositivi fotosensibili basati sul silicio, costituiti da elementi disposti in linea o in una matrice bidimensionale in grado di convertire un segnale luminoso (fotoni) in carica elettrica (elettroni). 'Nelle camere digitali – infatti – il modulo elementare del sensore è costituito da una piastrina di silicio: il *pixel*. Un sensore costituito da un grigliato, quadrato o rettangolare, di tante linee e colonne di *pixel*, viene detto di tipo 'a matrice' o [...] di tipo *area array*. Si chiamano invece 'lineari' o *linear array*, i sensori formati da un'unica riga di *pixel*.' (Cfr. M. Milli, L. Surace, *Le linee della costa. Definizioni, riferimenti altimetrici e modalità di acquisizione dei dati*, ed. Alinea, Firenze, 2011, p. 44).

77. Cfr. D. Acka, A. Gruen, *Comparative geometric and radiometric evaluation of mobile phone and still video cameras*, in 'The Photogrammetric Record', 2009, vol. 24(127), pp. 217-245.

78. 'Da un punto di vista progettuale – è possibile distinguere fra – i sensori areali multipli mosaicati (*frame based*) e sensori lineari *pushbroom*. I primi hanno il notevole vantaggio di una maggiore maneggevolezza, in quanto i singoli fotogrammi sono gestibili come delle scansioni di fotogrammi tradizionali; possono essere di vario tipo, con immagine finale generata attraverso l'assemblaggio digitale di più immagini, acquisite da obiettivi separati e su più bande spettrali. Il sistema da presa *pushbroom* consiste – invece – per ciascuna strisciata, di un unico file immagine per ciascuno dei sensori' consentendo 'l'acquisizione di coperture stereoscopiche sia nel visibile (RGB) che multi-spettrali.' (Cfr. M. Milli, L. Surace, *Le linee della costa. Definizioni, riferimenti...*, p. 44).

79. Sviluppati in origine per applicazioni militari, sono diffusi ormai in ambito civile ed in particolare nel settore del rilievo architettonico ed archeologico, in virtù della possibilità di registrare immagini sull'area di interesse colmando il *gap* esistente fra i tradizionali rilievi terrestri e quelli fotogrammetrici aerei.

80. Sistemi che consentono navigazioni e localizzazioni precise per la georeferenziazione dei dati.

81. Ovvero il telerilevamento. È la disciplina tecno-scientifica che consente di ottenere informazioni sia qualitative che quantitative sull'ambiente e sugli oggetti distanti dal sensore attraverso misure di radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa.

82. È un sistema di telerilevamento radar coerente, attivo e a microonde. Esso si basa, infatti, sulla possibilità di ottenere una risoluzione angolare elevata dall'analisi dello spettro del segnale in ricezione da un sistema radar di tipo coerente. La distribuzione dei valori mediati dell'onda elettromagnetica riflessa dalla superficie sulle aree di campionamento consente di ottenere un'immagine pixelizzata della regione rilevata.

83. Dal tradizionale impiego catastale e industriale ai video giochi, alle produzioni cinematografiche, alla documentazione del patrimonio culturale sino al campo medico (Cfr. F. Remondino, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architettura complesse*, op. cit., p. 94).

84. È possibile considerare l'approccio stereo come '*shape from parallax*', considerando come questo ricostruisca la geometria della scena da due o più immagini partendo dall'intersezione dei raggi proiettanti passanti per i punti omologhi individuati nelle immagini (Cfr. <https://www.cs.cmu.edu/~seitz/>).

85. Ossia alla variazione di luminosità della superficie. Infatti l'ombreggiatura è solitamente dipendente dall'orientamento della superficie rispetto alla sorgente luminosa.

86. I sistemi basati su tale principio hanno costi contenuti e sono adatti per rappresentare in 3D oggetti di piccole dimensioni con basse accuratezze.

87. Cfr. F. Remondino, S.F. El-Hakim, *Image-based 3D modeling: a review*, in 'Photogrammetry Record', vol. 21, n. 115, 2006, pp. 269-291.

88. Ovvero senza alcuna elaborazione geometrica.

89. Mentre nelle fotocamere analogiche, la pellicola altro non è che lo strumento su cui viene impressa la luce proveniente dall'ottica (obbiettivo), nei modelli digitali, essa è stata sostituita dal sensore. Quest'ultimo è un componente elettronico, realizzato in silicio e composto da una matrice di elementi detti fotodiodi, che cattura la luce traducendola prima in *pixel* e poi in informazione binaria affinché possa essere registrata sul supporto di memoria. Ad entrambi viene associata un'unità di misura, ISO e/o ASA (DIN in Germania), che indica la sensibilità con cui la luce viene impressa. Quanto più alto è il suo valore, tanto più sensibili alla luce saranno il sensore o la pellicola e dunque, a parità di condizioni, tanto più breve sarà l'esposizione.

90. Nel metodo analitico l'operatore osserva, interpreta l'immagine fotografica e ne estrae informazioni, selezionando punti – di cui ne misura le coordinate – utili per le seguenti fasi di orientamento e di restituzione. I procedimenti analitici fotogrammetrici possono essere considerati secondo tre fasi operazionali, ciascu-

na delle quali coinvolge specifici strumenti, cioè quelli mensurali per l'acquisizione dei dati di immagine, quelli computazionali per l'elaborazione e l'analisi dei dati ed infine quelli usati per la visualizzazione o la presentazione dei risultati (Cfr. T. J. Blachut, R. Burkhardt, *Historical Development of Photogrammetric ...*, op. cit., p. 1).

91. Cfr. L. De Luca, *La fotomodellazione architettonica*, op. cit., cap. 1, p. 24.

92. Cfr. Ivi.

93. Tecniche di *range imaging* e *fotomodellazione*, che permettono la ricostruzione di oggetti 3D partendo da punti estrapolati da immagini 2D. Queste sono basate su algoritmi sviluppati dalla *Computer Vision*, consentono di estrarre punti da immagini attraverso parametri fotografici.

94. Cfr. A. Bezzi, L. Bezzi, D. Benjamin, *Computer Vision e Structure From Motion, nuove metodologie per la documentazione archeologica tridimensionale: un approccio aperto*, in G. De Felice, M.G. Sibilano (a cura di), 'ARCHEOFOSS 2010', ed. Edipuglia, Bari, 2011, pp. 103-111.

95. Cfr. M. Vergauwen, L. Van Gool, *Web-based 3D Reconstruction Service*, in 'Machine Vision and Application. An International Journal', ed. Springer, 2006, vol. 17, pp. 411-426.

96. Cfr. F. Remondino, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architettura complesse*, op. cit., p. 94.

97. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 437.

98. Noti mediante la procedura di calibrazione.

99. F. Remondino, C. Fraser, *Digital camera calibration methods: considerations and comparisons*, in 'IAPRS', vol. XXX-VI(5), Dresden, 2006, p. 268.

100. La matrice disegno *A* contiene le derivate parziali delle equazioni di collinearità rispetto alle incognite e valutate con valori approssimativi.

101. È una matrice quadrata, simmetrica di *n* righe e colonne con *n* numero delle incognite, contenendo le informazioni necessarie per esprimere le precisioni dei punti calcolati. Mentre ciascun valore della diagonale indica la deviazione standard di ogni singola incognita, gli altri elementi mostrano la covarianza fra le incognite.

102. Cfr. A.M. Manfredini, F. Remondino, *Modellazione 3D da immagini Pipeline fotogrammetrica*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), 'Modelli digitali 3D in archeologia...', op. cit. p. 171.

103. Cfr. C.S. Fraser, *Network design*, in K.B. Atkinson (ed.),

'Close-range Photogrammetry and Machine Vision', Whittles Publishing, UK, 1996, pp. 256-282.

104. Nel caso di sensori *linear array*, dovrebbero essere impiegati invece altri approcci matematici, ma la descrizione di tali metodi è al di fuori del campo di applicazione considerate nella tesi.

105. Poiché tali informazioni erano direttamente fornite dal costruttore della camera tramite il relativo certificato di calibrazione.

106. Cfr. F. Remondino, *Photogrammetry*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), '3D Recording and Modelling...', op. cit., p. 66.

107. Come ad esempio quelli dovuti alla distorsione della lente.

108. F. Remondino, C. Fraser, *Digital camera calibration methods: considerations and comparisons*, op. cit., pp. 267-268.

109. Y.I. Abdel-Aziz, H.M. Karara, *Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry*, in 'Proc. Symposium on Close-Range', 1971, pp. 1-18

110. Cfr. D.C. Brown, *Close-range camera calibration*, in 'PE&RS', vol. 37(8), 1971, pp.855-866.

111. O. Faugeras, G. Toscani, *The calibration problem for stereo*, in 'Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition' (CVPR'86), Miami Beach, Fla, USA, 1986, pp. 15-20; R.Y. Tsai, *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*, in 'IEEE Int. Journal Robotics and Automation', 1987, vol. 3(4), pp. 323-344; J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, *Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation*, in 'IEEE Trans. on PAMI', 1992, vol. 14(10), pp. 965-980; J. Heikkilä, O. Silven, *A four-step camera calibration procedure with implicit image correction*, in 'IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition' (CVPR'97), San Juan, Puerto Rico, 1997, p. 1106-1112.

112. Duane C. Brown ha fornito significativi contributi al trattamento analitico fotogrammetrico, specie in aereotriangolazione. Oltre al trattamento di tutti i parametri di orientamento sia noti che incogniti, fra questi possiamo citare: la soluzione delle equazioni normali ottenute suddividendo la matrice per separare gli elementi di orientamento ed i punti di controllo a terra; il metodo di introduzione dei punti di controllo e dei parametri della stazione aerea con i pesi appropriati; lo sviluppo di un nuovo mono-comparatore che funziona secondo il principio di autotaratura, etc. (Cfr. S. K. Ghosh, *History of Photogrammetry, Analytical Methods and Instruments*, in 'International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information

Sciences', vol. XXIX(VI), Canada, 1992, p. 317).

113. Questi ultimi due parametri, in particolare, vengono usati prevalentemente nelle applicazioni richiedenti elevatissime precisioni, come ad esempio quelle industriali.

114. F. Remondino, C. Fraser, *Digital camera calibration methods: considerations and comparisons*, op. cit., p. 268.

115. Cfr. Ibidem, p. 269.

116. In tale modo l'efficienza aumenta se vengono utilizzati 8 raggi per ogni punto (Cfr. A.M. Manfredini, F. Remondino, *Modellazione 3D da immagini Pipeline fotogrammetrica*, op. cit., p. 172).

117. In caso di utilizzo di metodo assoluto, in particolare per le applicazioni di fotogrammetria aerea o satellitare, è necessario fornire ulteriori informazioni esterne, come alcuni punti di controllo a terra (cfr. Ibidem, p. 173).

118. Vedere M. Pierrot-Deseilligny, N. Paparoditis, *A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOTS-HRS stereo imagery*, in 'IAPRS', vol. XXXVI (1/W41), Ankara, 2006; H. Hirschmüller, *Stereo processing by semi-global matching and mutual information*, in 'IEEE Transaction on Pattern analysis and Machine intelligence', vol. XXX, 2008, p. 328-341; F. Remondino, S. El-Hakim, *Turning images into 3D models – Development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects*, in 'IEEE Signal Processing Magazine', vol. XXV, 2008, pp. 55-65; etc.

119. Cfr. F. Remondino, *Photogrammetry*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), '3D Recording and Modelling...', op. cit., p. 68.

120. Nei casi di fotogrammetria aerea o satellitare tali problemi sono, invece, in parte risolti, basti pensare all'ampia gamma di software commerciali per la triangolazione automatica e per la generazione automatica di modelli digitali del terreno (DTM) (Cfr. A.M. Manfredini, F. Remondino, *Modellazione 3D da immagini Pipeline fotogrammetrica*, op. cit., p. 175).

121. Sempre in maggior numero sono i *server*, i *software* e i centri di elaborazione che, anche *on-line*, restituiscono automaticamente modelli 3D di opere di architettura, archeologia o scultura, escludendo alcun processamento preventivo da parte dell'utente. Fra i più noti, 'Arch3D' prodotto dal 'ESAT-PSI Lab of U.K.' di Leuven (Belgio), 'MeshLab' dal 'Visual Computing Lab CNR-ISTI' in Italia, etc.

122. Una *mesh* (o maglia) poligonale è un insieme di vertici, spigoli e facce e cunei (entità composte da due facce adiacenti) che

definiscono la forma di un oggetto in applicazioni di modellazione solida e *computer grafica* 3D. L'unità base di tale maglia è il *voxel*, ossia *pixel* di volume. Le *mesh* possono consistere anche in poligoni semplici, tuttavia è possibile ricondurle a triangoli poiché ogni poligono può essere suddiviso in questi. Le *mesh* sono quindi primitive grafiche per la modellazione geometrica per suddivisione spaziale, rappresentando esplicitamente solo la superficie, mentre il volume è implicito.

123. Acronimo di *Triangulated Irregular Network*.

124. Cfr. A. Bezzi, L. Bezzi, D. Benjamin, *Computer Vision e Structure From Motion*, op. cit., p. 106.

125. Alcuni algoritmi presentano infatti, a causa della loro natura, efficienza limitata o massima nella loro applicazione.

126. Tale criterio analitico e afferente alla geometria computazionale prende il nome dal matematico che se ne occupò nel 1934, Boris N. Delaunay (San Pietroburgo, 1890 – Mosca, 1980). In base ad esso viene eseguita una triangolazione per un gruppo di punti su un piano, tale che nessuno di essi risulti all'interno di ogni circonferenza circoscritta a ciascun triangolo generato.

127. Ogni dispositivo che può acquisire o mostrare immagini, quale una macchina fotografica digitale, viene caratterizzato da un proprio metodo di rappresentazione interna del colore e dalla gamma di colori (*gamut*) che è capace di acquisire o visualizzare. La molteplice rappresentazione di un dato cromatico sui vari dispositivi viene regolata tramite degli standard, i quali permettono che un certo colore possa essere rappresentato in maniera il più possibile fedele su differenti dispositivi. Per le immagini RGB – spazio di colori di tipo additivo basato su tre colori (*Red*), verde (*Green*) e blu (*Blue*) le cui specifiche sono state descritte nel 1931 dalla CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) – si parla di immagini a colori a tre canali, ovvero di matrice immagine a tre piani in cui ogni colore è la sovrapposizione dei tra colori fondamentali e dove la saturazione di ognuno è rappresentata da un valore compreso fra 0 e 255.

128. 'Da un punto di vista della procedura, l'immagine sorgente è mappata su una superficie nello spazio oggetto 3D, che è a sua volta mappata nell'immagine destinazione (schermo) della proiezione vista. Mentre lo spazio *texture* è indicato con le coordinate (u,v) e lo spazio oggetto con quelle (x₀, y₀, z₀), lo spazio schermo è descritto da (x, y)' (Cfr. A. Baldassini, M. Gaiani, F. Remondino, *Rilievo, gestione e mappatura del colore*, in , in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), 'Modelli digitali 3D in archeologia...', op. cit., p. 220).

129. Tale problema può essere comunque superato anche in un secondo momento, grazie a metodi di *texture-blending* da eseguire nelle fasi di *post-processing*.

130. Le tipiche modalità in cui un modello poligonale 3D può essere visualizzato sono: *wireframe* (in fil di ferro), *shaded* (ombreggiato) o *textured* (texturizzato).

131. Cfr. A. Baldassini, M. Gaiani, F. Remondino, *Rilievo, gestione e mappatura del colore*, op. cit., p. 219.

132. Per cui ogni faccia è colorata interpolando i colori dei vertici che la individuano.

133. Cfr. F. Remondino, *Photogrammetry*, op. cit., p. 70; A. Baldassini, M. Gaiani, F. Remondino, *Rilievo, gestione e mappatura del colore*, op. cit., pp. 220-228.

134. Tale tecnica offre la possibilità, partendo 'da tre o più esposizioni dello stesso soggetto, di cui alcune sovrapposte, altre sottoposte, di fondere le informazioni in esse contenute in un'unica fotografia che contiene un buon livello di dettaglio' sia nelle zone più ombre che in quelle con luce intensa (molto utile per riprese di ambienti interni). Oltre che a recuperare i dettagli della scena e dell'illuminazione, l'acquisizione di immagini HDR può rimuovere le discontinuità di colore e gli effetti di *aliasing* (Cfr. Ibidem, p. 216; E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, P. Debevec, *High dynamic range imaging: acquisition, display and image-based lighting*, ed. Morgan Kaufmann Publisher, San Francisco USA, 2005).

135. Metodi che riescono a visualizzare *mesh* di grandi dimensioni con diversi livelli di dettaglio (LOD). La quantità di informazioni visibile in una rappresentazione grafica viene definita, appunto, tramite il LOD. Nella visualizzazione di modelli 3D, all'aumentare di tale parametro corrisponde la complessità di *rendering* della scena tridimensionale rappresentata.

136. Lo scopo originale dei metodi di *Computer Vision* è l'automazione dei processi, scommettendo più sulla velocità di calcolo che sull'esattezza metrica della ricostruzione 3D. (Cfr. L. Barazzetti, F. Remondino, M. Scaioni, *Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects*, in 'Videometrics, Range Imaging and Applications X, Processing of SPIE Optics+Photonics', vol. 7447, San Diego, CA, USA, 2010, pp. 12).

137. La *Computer Vision* è nata in effetti nei primi anni Settanta ed era considerata come la componente di percezione visiva di un programma ambizioso per dotare i robot di un comportamento intelligente, imitando l'intelligenza umana. A quel tempo i

pionieri della *Computer Vision* e della robotica ritenevano che la soluzione del problema dell'*input* visivo sarebbe stata una facile tappa lungo il percorso per raggiungere la soluzione di problemi più difficili, come l'intelligenza (Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, ed. Springer, 2010, p. 11).

138. Tra questi i più noti ed utilizzati sono lo *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT) ideato da Lowe e il *Kanade-Lucas-Tomasi Feature Tracker* (KLT), ulteriore sviluppo del lavoro di Lucas e Kanade ad opera di Tomasi e Kanade (Cfr. A. Bezzi, L. Bezzi, D. Benjamin, *Computer Vision e Structure From Motion*, op. cit., p. 103).

139. Cfr. L. Barazzetti, F. Remondino, M. Scaioni, *Automated and accurate orientation of complex image sequences*, in 'International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences', vol. XXXVIII(5/W16), Trento, 2011, p. 277.

140. L'argomento viene trattato in modo approfondito nelle pubblicazioni delle ricerche sulla cosiddetta *multi-view geometry* (Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, op. cit., p. 363).

141. Ossia la presenza spesso di immagini convergenti, ampie variazioni radiometriche e geometriche fra le immagini.

142. Cfr. L. Barazzetti, F. Remondino, M. Scaioni, *Automated and accurate orientation of complex image sequences*, op. cit., p. 277.

143. Mentre la corrispondenza (*matching*) fra coppie di immagini era un modo utile per ottenere le informazioni sulla profondità, l'impiego di corrispondenze fra un maggior numero di immagini sorgente può portare a risultati ancora migliori. La ricerca si orientò non solo sulle tecniche per la creazione di modelli completi di oggetti 3D, ma anche su tecniche più semplici finalizzate a migliorare la qualità delle mappe di profondità utilizzando più immagini, a produrre descrizioni volumetriche 3D da sagome binarie, a monitorare i profili con contorni attivi, etc. (Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, op. cit., p. 558-559).

144. Tale termine viene comunemente usato per descrivere la creazione di modelli 3D con *texture-mapped* da immagini multiple. Pare che esso fu utilizzato inizialmente da Debevec, Taylor e Malik nel 1996, analogamente a *photogrammetric modeling* (Cfr. Ibidem, p. 621; Cfr. L. De Luca, *La fotomodellazione architettonica*, op. cit., p. 24).

145. Durante gli ultimi 25 anni, il termine è apparso per la prima volta nel 1995, *la image-based rendering* è emersa come una

delle applicazioni più interessanti della CV. In tale approccio le tecniche di ricostruzione 3D di *Computer Vision* sono combinate con le tecniche di *rendering* di *Computer Grafica*, le quali utilizzano più viste di una scena per creare rappresentazioni foto-realistiche interattive. Si sono sviluppate varie tecniche di *image-based rendering*: fra queste la cosiddetta *view interpolation*, le rappresentazioni 4D *light field* e *Lumigraph*, etc. (Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, op. cit., p. 623).

146. Secondo lo studio effettuato nel 2006 da Seitz, l'utilizzo di algoritmi *multi-view stereo* permetteva di raggiungere una precisione migliore di 1/200 utilizzando fotografie a bassa risoluzione (Cfr. S. Seitz S., B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein, R. Szeliski, *A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms*, in 'IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition', New York, NY, 2006, pp. 519-526).

147. Cfr. L. Barazzetti, R. Roncella, G. Forlani, F. Remondino, M. Scaioni, *Orientamento automatico di blocchi fotogrammetrici in ambito close-range: stato dell'arte e prospettive della ricerca*, in A. Manzano, A. Spalla, 'Geomatica, le radici del futuro. Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galetto', Pavia, 2011, p. 131-140.

148. Generalmente gli algoritmi di *matching* applicati per la correlazione automatica di immagini vengono classificati in due categorie principali: algoritmi di tipo *feature* o *area based* e algoritmi di tipo denso (*dense stereo*). Mentre i primi forniscono informazioni su un numero limitato di punti ben riconoscibili tramite *features*, ottenendo così delle mappe denominate 'mappe di disparità'; i secondi operano al fine di generare mappe di disparità per ogni punto di immagine. Gli algoritmi di *area-based matching* e *feature-based matching* si differenziano, a loro volta, per il tipo di primitiva impiegata per la correlazione, ovvero in base al grado di similitudine dei valori di grigio nell'area dell'immagine attorno al punto di interesse. Fra gli algoritmi *area-based* il metodo più efficace e preciso consiste nel calcolare, ai minimi quadrati, 6 o 8 parametri per descrivere la trasformazione fra due aree (*Least Squares Matching*); il metodo, esteso invece a più immagini contemporaneamente, viene chiamato *Multi-Photo Geometrical Constraints* (MPGC) *Least Squares Matching* (Cfr. Remondino, Cfr. A.M. Manfredini, F. Remondino, *Modellazione 3D da immagini Pipeline fotogrammetrica*, op. cit., p. 174).

149. Di fronte ai cambiamenti di contrasto di luce, di punti di

vista o di scala, ad esempio, mostrati da un blocco di fotografie terrestri, la progettazione di algoritmi *feature descriptors* indipendenti dalla posizione dei *keypoints* e maggiormente robusti e stabili rispetto alle diverse trasformazioni delle immagini diviene uno degli obiettivi perseguiti dalla *Computer Vision*. Fra gli algoritmi descrittivi più comuni, oltre al SIFT, ci sono il SURF, il MOPS, il PCA-SIFT, il GLOH, etc. (Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, op. cit., p. 223).

150. Poiché i descrittori sono vettori numerici (n-dimensionali), è possibile confrontarli e classificarli tramite la semplice funzione distanza euclidea. Dato un punto nella prima immagine I_a avente il descrittore d_a , il punto omologo nell'immagine I_b è quello che ha il descrittore più vicino a d_a .

151. Una volta fornita una distanza euclidea metrica, la strategia di abbinamento più semplice è quella di impostare una soglia (distanza massima) e di restituire tutte le corrispondenze dalle altre immagini entro di essa. La determinazione di una soglia troppo alta o troppo bassa, ad esempio, conduce rispettivamente ad un numero eccessivo di corrispondenze sbagliate da restituire (falsi positivi) oppure ad un numero eccessivo di abbinamenti corretti persi (falsi negativi) (Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, op. cit., pp. 227-228).

152. Nonostante l'ordinamento degli algoritmi *feature descriptors* non cambi più di tanto, la loro performance complessiva varia significativamente fra le diverse strategie di corrispondenza. Per ottenere un'operazione di *feature matching* più efficiente, il modo più semplice per trovare tutti i punti di legame è quello di confrontare ciascuna *features* per ogni coppia di immagini potenzialmente corrispondenti. L'approccio migliore è quindi quello di progettare una struttura di indicizzazione, ad esempio una struttura di ricerca ad albero multidimensionale o una tabella *hash*, per cercare rapidamente le *features* più vicine a quelle date. Uno degli algoritmi di *matching* che incrocia le caratteristiche, tracciandole, da un'immagine all'altra è quello di Lukas-Kanade (Cfr. Ibidem, pp. 231-232; K. Mikolajczyk, C. Schmid, *A performance evaluation of local descriptors*, in 'IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence', vol. 27(10), 2005, pp. 1615-1630; B. D. Lucas, T. Kanade, *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*, in 'Proc. 7th Intl Joint Conf on Artificial Intelligence' (IJCAI), Vancouver, 1981, pp. 674-679).

153. Cfr. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithm and Applications*, op. cit., p. 223.

154. Cfr. D.G. Lowe, *Distinctive image features from scale-in-*

variant keypoints, in 'International Journal of Computer Vision', vol. 60(2), 2004, pp. 91-110.

155. Cfr. A. Bezzi, L. Bezzi, D. Benjamin, *Computer Vision e Structure From Motion*, op. cit., p. 104.

156. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 461.

157. Tuttavia anche se tali parametri della camera non sono noti, si possono imporre alcune condizioni, come ad esempio la forma del *pixel* rettangolare o quadrata, il rapporto d'aspetto costante in tutta la sequenza dei fotogrammi, il punto principale della camera al centro dell'immagine, etc. imponendo tali condizioni si può eseguire la calibrazione della camera. La calibrazione facilita la ricerca dei punti corrispondenti e permette di trovare riscontri per la maggior parte dei *pixel* delle immagini (Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 462).

158. Mentre il termine *bundle* si riferisce ai fasci dei raggi che collegano i centri della fotocamera per punti 3D, *adjustment* è riferito alla minimizzazione iterativa dell'errore durante il tentativo di proiezione.

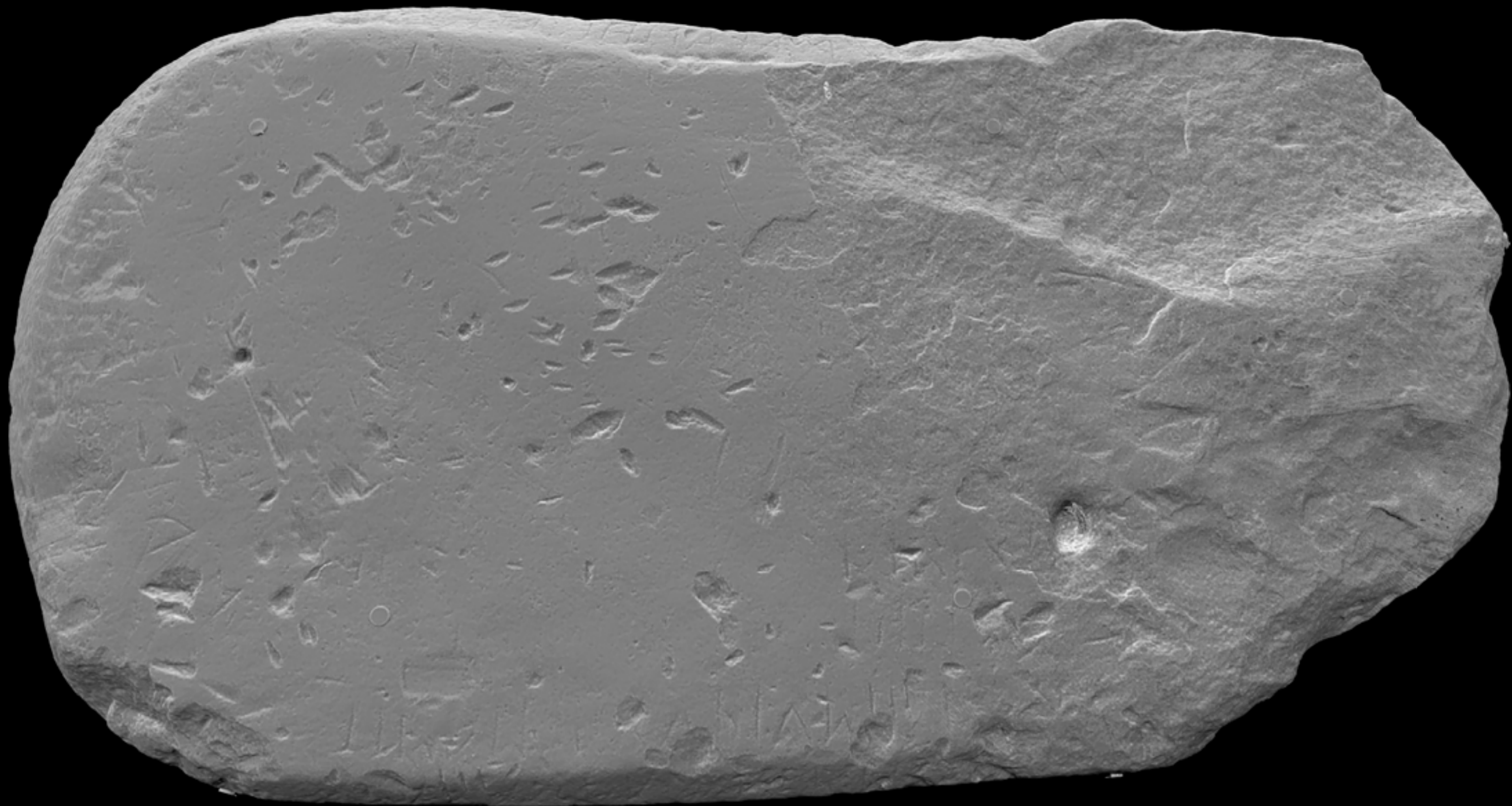
159. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 462.

160. Cfr. A. Bezzi, L. Bezzi, D. Benjamin, *Computer Vision e Structure From Motion*, op. cit., p. 104.

161. Cfr. Ivi.

162. A partire dai numerosi software *open-source* – come *Bundler* e *PMVS*, *Visual SFM*, etc. – e commerciali – come *PhotoScan*, *Photomodeler Scanner*, *3D Zephir Aerial*, etc. – fino alle applicazioni *3D web service* – come *ARC3D*, *Autodesk 123D Catch*, etc.

163. Cfr. A. Bezzi, L. Bezzi, D. Benjamin, *Computer Vision e Structure From Motion*, op. cit., p. 104.



4. Sistemi di acquisizione range-based: i sensori ottici attivi

I sistemi a scansione, quali strumenti di misura ottici attivi in grado di restituire direttamente la realtà in tre dimensioni, convertono di fatto la forma fisica della superficie misurata in un grande numero di coordinate 3D. Tali strumenti attivi basati sulle onde luminose, come i sistemi *image-based*, sono costituiti da un emettitore di luce e da un sensore per registrarne la risposta. Tuttavia, mentre le tecniche passive usano la luce ambientale e richiedono un modello matematico per derivare le coordinate tridimensionali di punti 2D identificabili nelle immagini, i sensori attivi impiegano luce artificiale – come ad esempio il laser – per fornire in modo diretto le coordinate 3D dell'oggetto rilevato. Questi, infatti, consentono di acquisire automaticamente – e con elevata densità – le coordinate spaziali dei punti distribuiti su una porzione di un oggetto registrato dallo strumento *range*¹.

Le tecniche *reality-based* basate sui sensori attivi, come gli scanner laser, lavorando dunque in maniera del tutto automatica, permettono di registrare in 3D un sito complesso, fornendo speditamente un *output* metrico che può essere utilizzato per ricostruire manufatti e monumenti, rivedere stratigrafie complesse, ridisegnare sezioni trasversali e calcolare volumi, altrimenti difficili da ottenere.

Se da un lato l'approccio basato sul campo di rilevamento *range* si dimostra molto più veloce delle metodologie manuali tradizionali o di quelle basate sul teodolite, dall'altro rimuove le impressioni soggettive dalla registrazione che possono influenzare l'interpretazione dei dati successiva. Infatti il processo di acquisizione tramite sensori attivi non è capace di discernere spigoli e linee che definiscono la geometria dell'oggetto, comportando un grado di dettaglio costante sia per le porzioni piane che per quelle più articolate². In altri termini la conversione da realtà fisica in una serie di punti di coordinate note, distribuiti regolarmente sulle varie porzioni di superficie della scena rilevata, viene svolta dai sistemi a scansione – come dice Fulvio Rinaudo – ‘effettuando una selezione dei punti secondo un ordine preconstituito di acquisizione e quindi senza operare alcun tipo di scelta sulla necessità o meno del punto acquisito

nella descrizione della geometria³. Di conseguenza l'esito di una scansione costituisce una serie di informazioni a partire dalle quali può iniziare una coerente fase di interpretazione e codifica dei dati tridimensionali.

Il modello 3D risultante può essere così utilizzato non solo come base di dati geometrici da consultare in seguito, ma anche quale punto di ingresso per l'accesso ai diversi tipi di dati informativi collegabili al modello metrico.

4.1 Storia dei sensori attivi

Il metodo di rilievo che si basa sui ‘sensori attivi’, cioè su apparecchi che convertono l'energia in ingresso in energia in uscita, senza essere alimentati dall'esterno, è nato nel 1933 per opera del sovietico Balaicov che brevettò il primo ‘distanziometro ad onde’. In seguito, nel 1938, il connazionale Lebedev ne costruì il primo prototipo. Ma è solo dagli anni Settanta che furono messi in commercio, e quindi resi accessibili a tutti, i primi distanziometri ad onde, fatto che ha reso possibile misurare le distanze con facilità, determinando una rivoluzione delle metodologie di rilievo e di trattamento dei dati.

La novità sta nel fatto di trasformare la natura dell'energia, in modo da passare da una forma di energia elettrica, ad un fascio monocromatico coerente da radiazioni elettromagnetiche di elevata intensità: in altri termini l'amplificazione della luce mediante il fenomeno dell'emissione stimolata di radiazione, cioè il ‘LASER’⁴.

Il primo scienziato che ha studiato ed approfondito l'emissione del raggio *laser* è stato Albert Einstein⁵ nel 1917; la sua ipotesi sosteneva che l'emissione, da un atomo, di un raggio di luce ad alta intensità energetica potesse essere stimolata da un raggio di luce incidente ad una certa frequenza. Egli formulò così le basi teoriche⁶ del *laser* e del *maser* attraverso una riderivazione delle leggi sulla radiazione di Max Planck⁷.

Le radiazioni emesse vengono normalmente concentrate attraverso una cavità ottica con pareti interne riflettenti, ed

Fig. XIV – Nelle pagine precedenti vista zenitale del modello 3D ad alta risoluzione della Stele di Vicchio acquisito con strumentazione range a triangolazione.

una zona di uscita semiriflettente. Quest'ultima superficie è l'unica che permette la fuoriuscita del raggio, il quale viene successivamente lavorato e riposizionato attraverso una serie di lenti e specchi per far sì che il raggio risultante abbia posizione, concentrazione e ampiezza desiderate. Nel 1928 Rudolf W. Ladenburg⁸ dimostrò l'esistenza dell'emissione stimolata e dell'assorbimento negativo. Undici anni dopo, il fisico sovietico Valentin A. Fabrikant predisse l'uso dell'emissione stimolata per amplificare le onde corte. Nel 1947 Willis E. Lamb⁹ and R.C. Retherford¹⁰ effettuarono la prima dimostrazione dell'emissione stimolata. Nel 1950 Alfred Kastler¹¹ utilizzando in maniera combinata sistemi di risonanza ottica e nucleare, sviluppò la tecnica del 'pompaggio ottico'. Questi studi condussero al completamento dell'apparato teorico riguardante laser e maser.

La paternità del laser ancora oggi non è chiara; è certo, però, che il fisico americano Charles Townes¹² e il suo studente Gordon Gould¹³ si basarono sui lavori e sugli studi di Einstein arrivando fino all'effetto chiamato 'emissione stimolata di radiazione', per cui è possibile indurre un atomo a emettere radiazione 'illuminandolo' con una radiazione dello stesso tipo. Nel 1953 realizzarono il 'maser', un apparecchio simile al laser, ma incapace di operare in modo continuo. Nel frattempo due fisici, il sovietico Nikolay Basov¹⁴ e l'australiano Aleksandr Prokhorov¹⁵ risolsero il problema usando più di due livelli di energia.

Townes ed un suo collega della Columbia University, Arthur Schawlow¹⁶, cercarono di ottenere lo stesso effetto con radiazione di lunghezza d'onda ancora più piccola, come la luce infrarossa o visibile. Grazie all'idea di quest'ultimo di sistemare degli specchi agli estremi della cavità, nel 1958 i due scienziati americani brevettarono quest'invenzione.

Il nome '*Laser*' venne dato da Gould che ne depositò lo schema, ma la comunità scientifica ne attribuisce l'elaborazione teorica a Townes, Basov e Prokhorov, ai quali venne assegnato, nel 1964, il Premio Nobel per la fisica 'per il lavoro fondamentale nel campo dell'elettronica quantistica, che ha portato alla costruzione di oscillatori e amplificatori basati sul principio *maser-laser*'.

In realtà il primo dispositivo effettivamente utilizzabile fu sviluppato da Theodore Maiman¹⁷ che nel 1960 brevettò, presso i laboratori della Hughes Research a Malibù, in

California, il 'laser a rubino' sviluppando ulteriormente la teoria di Einstein sull'emissione stimolata di radiazioni. Si trattava di un laser a stato solido che sfruttava il cristallo di rubino in grado di produrre un raggio laser rosso con una lunghezza d'onda di 694 nm. È questa l'invenzione più importante che ha dato vita a tutte le successive applicazioni laser nei più disparati campi della scienza¹⁸. Sempre nel 1960 Ali Javan¹⁹, William R. Bennett²⁰ e Donald Herriott²¹ costruirono il primo laser utilizzando l'elio ed il neon, definito '*maser* ottico a gas', in grado di produrre un raggio infrarosso. Nel 1963 K. Patel dei *Bell Laboratories*²² mise a punto il laser ad anidride carbonica. Nel 1971 Izuo Hayashi²³ e Morton B. Panish²⁴ degli stessi laboratori disegnarono il primo laser a semiconduttori (diodo laser) in grado di operare in continua a temperatura ambiente. Nel 1977 viene attribuito un brevetto per il 'pompaggio ottico' a Gordon Gould e, nel 1979, un brevetto descrive una grande varietà di applicazioni del laser, incluso riscaldamento e vaporizzazione dei materiali, saldatura, foratura, taglio, misurazione delle distanze, sistemi di comunicazione, sistemi di fotocopiatura oltre a varie applicazioni fotochimiche.

A partire dagli anni Ottanta il laser è stato sempre più usato in ogni campo della scienza, ed il suo utilizzo nell'ambito del rilievo si è ulteriormente affinato anche grazie alla creazione di macchine sempre più specifiche nel settore degli scanner.

4.2 Tecnologia e principi di funzionamento

I sistemi a scansione, in particolare quelli basati sulla luce laser, rendono il risultato della misurazione quasi indipendente dalla consistenza dell'oggetto da fotografare, proiettando i riferimenti sulla sua superficie attraverso una luce opportunamente codificata (come ad esempio una matrice di punti o di una serie di bande colorate). Tale luce è caratterizzata da un contenuto informativo intrinseco riconoscibile da un sensore elettronico, a differenza della luce diffusa ambientale, che non ha particolari elementi identificabili.

Grazie a tale codifica i sensori attivi possono acquisire in forma digitale il comportamento spaziale di una superficie dell'oggetto. L'*output* ottenibile da tali dispositivi

può essere visto come un'immagine avente in ogni *pixel* le coordinate spaziali (x, y, z) espresse in millimetri, eventualmente arricchite dalle informazioni colore (R, G, B) o dalla riflettanza del laser (Y). Questo insieme di dati 3D, chiamato *range image*, è in genere un'entità 2.5D, cioè ad ogni coppia di valori x, y è definito un solo valore di z .

Il funzionamento di uno scanner 3D dipende, *in primis*, da quella forma di luce che prima ne ha permesso la realizzazione: la luce laser. Quest'ultima, grazie alle sue proprietà fisiche, permette di generare *spot* luminosi estremamente focalizzati su intervalli di distanza relativamente lunghi dalla sorgente luminosa, rispetto a ciò che può essere fatto, per esempio, con una lampada alogena. La ragione di questo è legata alla struttura intima della luce, che è fatta da fotoni, particelle di energia elettromagnetica caratterizzati dalla loro stessa frequenza e lunghezza d'onda. Un laser genera una luce particolare che è monocromatica – ovvero fatta da fotoni tutti alla stessa lunghezza d'onda – e coerente, cioè tale che tutti i fotoni sono generati in diversi istanti di tempo, ma con la stessa frequenza. La conseguenza pratica del primo aspetto (monocromaticità) è che le lenti utilizzate per la focalizzazione di un laser può essere molto più efficace, essendo progettate per una singola lunghezza d'onda, piuttosto che per l'ampio spettro di lunghezze d'onda tipiche della luce bianca. In altre parole con un laser è più facile concentrare l'energia nello spazio. D'altra parte il secondo aspetto (coerenza) consente a tutti i fotoni di generare un'interferenza di onde costruttiva, la cui conseguenza è una concentrazione di energia nel tempo. Entrambi questi fattori contribuiscono a rendere il laser una fonte di illuminazione efficace per la selezione dei punti specifici di uno scenario – soprattutto se in questo c'è un alto contrasto rispetto allo sfondo – consentendo di misurare la loro posizione spaziale.

Gli strumenti che impiegano tecniche 3D *laser-based*²⁵, classificati in virtù del principio di misura della distanza sfruttato, si distinguono sostanzialmente tra sistemi a triangolazione e sistemi distanziometrici (o a tempo di volo TOF). Dal momento in cui a tale distinzione viene fatto coincidere, spesso, il diverso livello di precisione dei vari scanner laser, oltre che la differenza del loro *range* operativo, la scelta fra i due principi di funzionamento viene eseguita a seconda delle dimensioni e della distanza fra il sensore e l'oggetto di interesse.

Così, in generale, per misurare oggetti di piccola o media dimensione si utilizzano scanner laser a triangolazione, mentre per le opere di dimensioni maggiori si impiegano scanner laser TOF (ad impulsi o a differenza di fase).

4.3 Sistemi a triangolazione

I sistemi a scansione che permettono di raggiungere precisioni sub-centimetriche, e quindi idonei al rilievo di volumi piccoli, indicativamente inferiori al metro cubo, sono quelli che si basano sul principio – proprio della fotogrammetria – della triangolazione: il punto viene rilevato come intersezione di due rette di direzione nota nello spazio.

Infatti se pensiamo allo schema tipo di un strumento *range* composto da una semplice sorgente luminosa (luce laser o strutturata) ed un sensore di ripresa piano (tipicamente un sensore digitale CCD o CMOS) – rigidamente delimitati a vicenda – esso costituisce un paradigma per i vari tipi di scanner a triangolazione. La sorgente laser genera un sottile fascio di luce che, colpendo la superficie da misurare, produce su di essa un piccolo punto luminoso (A), a sua volta riflesso e catturato dal sensore di ripresa. Infatti quest'ultimo, quale strumento di acquisizione 2D spostato lateralmente rispetto alla sorgente di luce, può acquisire – se la superficie è abbastanza diffusiva per riflettere un po' di luce anche verso l'obiettivo della camera – un'immagine contenente il punto luminoso.

In questo schema ottico-geometrico il fascio di luce materializza un triangolo ideale, in cui il punto riflesso sulla superficie, la sorgente del raggio di luce incidente ed il centro di proiezione sul sensore ne formano i tre vertici; la distanza fra quest'ultimi due ne costituisce invece la base, la cosiddetta *baseline* (b) della triangolazione.

La lente posta di fronte al sensore è caratterizzata dalla sua lunghezza focale f , ovvero la distanza in mm dal centro ottico della lente al piano focale. Sull'immagine raccolta, una traccia del punto luminoso sarà visibile in posizione disassata – di una quantità p (parallasse) – rispetto al centro ottico dell'obiettivo. A seconda della posizione del punto riflesso rispetto all'asse ottico, vengono generate due componenti di spostamento lungo la direzione orizzontale (x) e quella verticale (y); tuttavia fra queste, come rappresentato dallo schema (*Fig. 24*), qui si considera solo

la prima componente di tale disassamento (p). Pertanto, se il sistema è già stato calibrato, è possibile considerare noti a priori sia l'inclinazione (α) del fascio laser e la linea di base (b) e, una volta stimata la misura dello spostamento p e nota la distanza focale f , si può facilmente calcolare l'angolo di ripresa (β):

$$\tan \beta = \frac{p}{f} \quad [15]$$

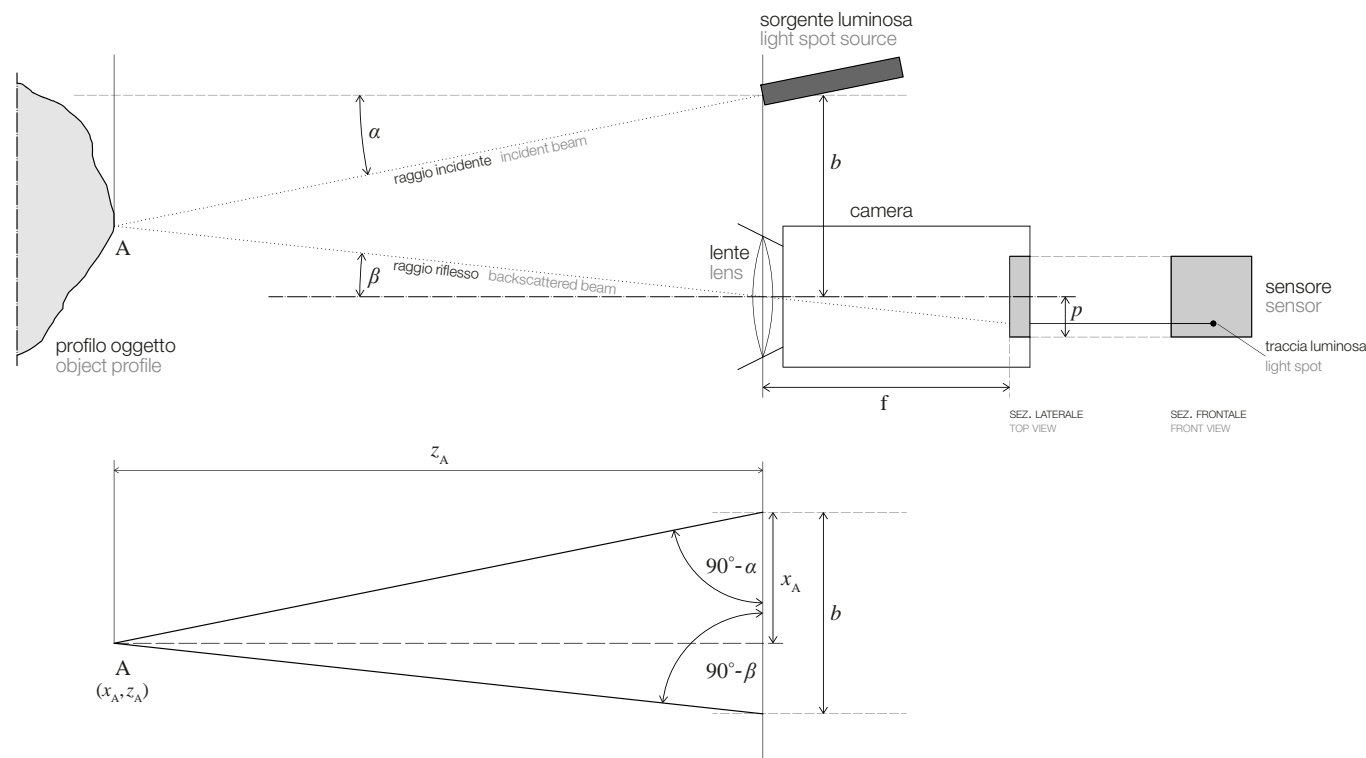
Dunque, stabiliti i tre parametri (b , α e β), sono noti gli elementi del suddetto triangolo – appunto la base b e i due angoli, rispettivamente ($90^\circ - \alpha$) e ($90^\circ - \beta$) – da cui calcolare, tramite trigonometria, tutte le altre misure. Si può ricavare il valore più critico²⁶, ovvero la distanza z tra la camera di ripresa e il punto riflesso A sull'oggetto, come segue:

$$z_A = \frac{b}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad [16]$$

Moltiplicando questo valore per la tangente di α , si ottiene infine la coordinata orizzontale x_A , ovvero:

$$x_A = z_A \tan \alpha \quad [17]$$

In altri termini risulta soddisfatto il principio della triangolazione che consente di calcolare le coordinate dei vertici di un triangolo, conoscendo la misura di uno dei lati (base della triangolazione) e i due angoli azimutali compresi fra le direzioni uscenti dai due vertici della base (angoli di proiezione e di ripresa). La ragione per cui in questa descrizione schematica non appare (y_A) è dovuta al fatto che, in una tecnica simile, il sensore può essere ridotto ad una singola matrice di elementi fotosensibili, differentemente da quelli di cui sono dotati le fotocamere digitali. In tal caso (y_A) può essere determinata *a priori*, attraverso il montaggio di un sistema di misurazione ottica su un dispositivo meccanico micrometrico, fornendo la sua posizione rispetto ad un'origine y nota.



Nell'applicazione di uno strumento a triangolazione, la cosiddetta regione di interesse o ROI (*Region Of Interest*), cioè il volume che può essere effettivamente misurato dallo strumento *range*, viene definita dalla profondità di campo del sistema complessivo, costituito da sorgente di illuminazione e ottica. Infatti, dal momento in cui la profondità di campo di una camera dipende da una combinazione fra lunghezza focale ed apertura, per sfruttare al meglio tale regione, è opportuno che anche il fascio laser venga focalizzato alla distanza focale della camera – con un intervallo focale relativamente lungo – in modo da avere la dimensione del punto pressoché invariata all'interno della ROI. Una volta soddisfatte entrambe queste condizioni, la dimensione ROI può essere ulteriormente aumentata inclinando l'ottica del sensore, analogamente a quanto definito dal principio di Scheimpflug²⁷.

4.3.1 Scanner laser a triangolazione: piano luminoso singolo

Lo schema di principio di uno strumento a singolo *spot laser*, può essere esteso ad uno scanner che proietta, invece di un solo punto luminoso, una serie di *spot* allineati che vanno a formare un segmento – la cosiddetta 'lama' di luce – che permette di acquisire, perciò, non soltanto le coordinate tridimensionali di un punto, ma quelle di un intero profilo dell'oggetto²⁸. Infatti, i sistemi *range* di questo tipo, utilizzano una lama di luce generata attraverso un laser riflesso da uno specchio rotante o da una lente cilindrica, e registrata mediante una camera digitale disassata di una base b . Tale fascio di luce produce una linea retta se proiettato su una

superficie piana, un profilo curvo, invece, nel caso di superfici complesse.

Ogni punto del profilo risponde alla regola, già vista per il sistema a singolo *spot*, con la sola differenza che qui il sensore deve essere bidimensionale, cosicché si possano stimare entrambe le componenti di parallasse – quella orizzontale (x) e quella verticale (y) – per ogni punto del profilo.

Infatti, i valori di tali spostamenti (p_x e p_y) sono necessari per calcolare i corrispondenti angoli orizzontali (angolo β) e verticali (angolo γ) da cui, assieme alla conoscenza della *baseline* (b) e della distanza focale f , è possibile ricavare le tre coordinate di ogni punto del segmento.

Così:

$$\tan \beta = \frac{p_x}{f} \quad [18]$$

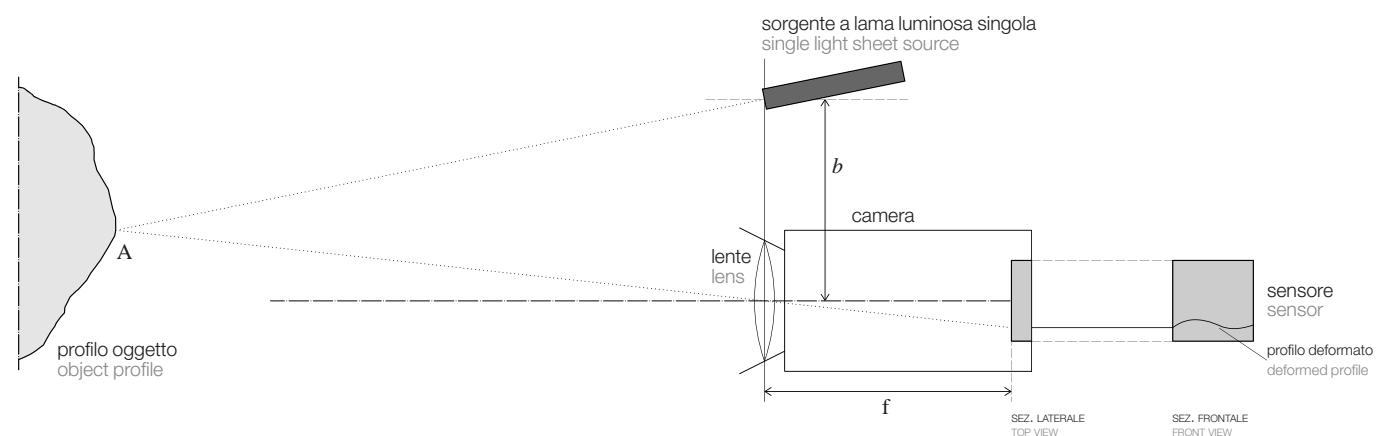
$$\tan \gamma = \frac{p_y}{f} \quad [19]$$

Le tre coordinate (x_A, y_A, z_A) di un punto generico che compone la lama luminosa sono ottenute tramite trigonometria; mentre per calcolare (x_A) e (z_A) si impiegano formule analoghe a quelle per gli scanner a singolo *spot*, la y_A si ottiene da:

$$y_A = z_A \tan \gamma \quad [20]$$

Questo processo permette, quindi, di calcolare una serie di coordinate 3D corrispondenti al profilo illuminato per un dato posizionamento fra luce e oggetto. Tuttavia, spostando – di volta in volta – il piano luminoso di una piccola quantità (Δy) lungo la sua normale, è possibile rilevare un'ulteriore striscia di superfici, generando una nuova matrice di dati 3D riferiti ad una porzione geometrica vicina a quella precedente. Di conseguenza, lo scanner laser 3D è uno strumento che, attuando l'iterazione di tale processo per un numero di posizioni, genera un insieme di matrici, le quali descrivono la geometria di un'intera area, striscia per striscia. Del resto, questo tipo di immagine tridimensionale – *range image* o *range map* – indicata anche come nuvola di punti 3D strutturata, costituisce l'esito del processo di scansione laser.

Per ottenere un'immagine tridimensionale relativa ad una porzione di un oggetto, dunque, è necessario muovere tali



sensori attivi in maniera meccanicamente controllata, il che porta al concetto stesso di scansione, producendo come risultato – appunto – una *range map* relativa ad un'area la cui dimensione dipende dall'estensione del movimento²⁹. D'altra parte è proprio grazie al tipo di movimento con cui uno scanner laser viene spostato, che lo strumento riesce a scandire correttamente un'intera superficie. Al fine di una scansione completa, il sistema a singolo *spot*, acquisendo inizialmente le coordinate di un punto (x_A, z_A) , impiega un dispositivo meccanico per spostare la testa dello scanner – l'insieme sorgente laser, ottica e sensore – lungo gli assi x ed y . Gli strumenti a lama di luce laser, acquisendo le coordinate di un intero profilo (x_A, y_A, z_A) , invece, per ricavare efficacemente la volumetria di un oggetto, richiedono che venga impressa una traslazione, o una rotazione alla loro testa di scansione.

4.3.2 Sensori a proiezione di pattern: piani luminosi multipli

Un ulteriore sistema a triangolazione è caratterizzato dalla proiezione di *pattern*: vengono simultaneamente prodotti più piani di luce, grazie ad un apposito proiettore – al posto dell'emettitore di luce laser – che genera un *pattern* luminoso (di luce alogena) a strisce bianche e nere, orizzontali o verticali, etc³⁰. Così, mentre una camera digitale acquisisce un'immagine della superficie illuminata dal *pattern* luminoso, ciascuna transizione da nero a bianco (B-W) all'interno di esso viene utilizzata come profilo geome-

trico, analogamente a quelli prodotti da una lama di luce laser incidente su una superficie sconosciuta³¹. Nonostante il principio della triangolazione impiegato sia il medesimo, la principale differenza rispetto ai precedenti scanner dei sistemi che proiettano *pattern*, consiste nel fatto che in quest'ultimi non sono richieste parti mobili, poiché non viene eseguita alcuna operazione di scansione effettiva e la nuvola di punti viene calcolata esclusivamente attraverso la post-elaborazione digitale dell'immagine acquisita. La stima delle tre coordinate per ogni *pixel* dell'immagine si basa sul modo in cui il *pattern* proiettato, conosciuto *a priori*, si deforma in relazione alla geometria della superficie³².

In tale modo quanto più numerose saranno le transizioni B-W proiettate sulla superficie testata, tanto migliore risulterà il suo campionamento spaziale, con il conseguente aumento della risoluzione geometrica. In altri termini un *pattern* più sottile pare essere la soluzione più adatta per ricavare la quantità massima di dati da una singola immagine, sebbene – da un punto di vista pratico – ciò non sia del tutto vero.

Questo dipende, infatti, dall'impossibilità di individuare ciascuna transizione B-W, in un'immagine di una superficie ignota con una sequenza di strisce proiettate su di essa, a causa della possibile elaborazione di un sottoinsieme sconosciuto del modello proiettato (nel caso ad esempio di superfici molto vicino alla camera) o per la presenza di fori o occlusioni che generano ambiguità nell'ordine delle strisce. Per risolvere tale ambiguità questa categoria di scanner 3D impiega una sequenza di *pattern* anziché uno solo.

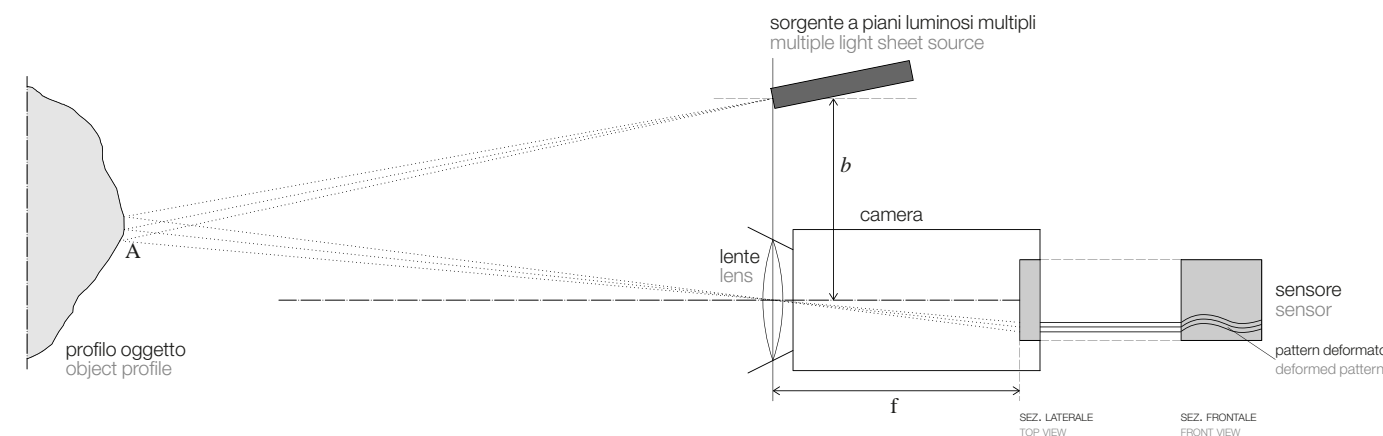


Fig. 25 – (nella pagina precedente) Acquisizione di coordinate lungo un profilo generato da lama di luce laser. In uno scanner laser 3D questo profilo viene spostato meccanicamente per sondare un'intera area.

Fig. 26 – (sopra) Acquisizione delle coordinate lungo alcuni differenti profili generati da frange multiple di luce bianca.

Nello specifico l'approccio più utilizzato è la sequenza codificata con il cosiddetto *Gray-Code*, che impiega una serie di *pattern* in cui il numero di strisce è raddoppiato ad ogni passo, fino a raggiungere il numero massimo consentito dallo proiettore di luce strutturata. Comunque sono state sviluppate e implementate altre sequenze di *pattern*, come ad esempio un sistema a variazione di fase (*phase-shift*) o Moirè³³, con diverse prestazioni metrologiche. In generale, gli scanner 3D a luce strutturata, acquisendo un'area senza ausili meccanici, si contraddistinguono per la loro velocità³⁴ – infatti taluni di questi sono in grado di scansionare in tempo reale anche oggetti in movimento – e per la densità di campionamento, correlata ovviamente alla risoluzione del videoproiettore; per l'ottima risoluzione lungo la direzione z , relativamente a superfici piane; oltre che per la loro accuratezza, paragonabile ai sistemi che utilizzano la sorgente laser, nonostante la minore profondità di campo.

Inoltre rispetto agli scanner laser a singolo *spot* e a lama di luce, i quali acquisiscono i dati senza essere influenzati, in termini di precisione della misura, dall'illuminazione dell'ambiente – almeno entro certi limiti – per gli strumen-

ti a luce strutturata viene richiesta una significativa pen- denza della luce ambientale.

In definitiva i sistemi di rilevamento attivi a triangolazione consentono prestazioni di misura elevate, con risoluzioni addirittura fino al decimo di millimetro ed un'incertezza di poche decine di micron, ma hanno il limite di lavorare entro distanze e campi di inquadratura contenuti – come stigmatizza Gabriele Guidi – la dimensione dei volumi che possono facilmente acquisire varia da una scatola di scarpe ad una statua³⁵. Per una risposta precisa del sensore sul rapporto fra la distanza camera di ripresa-target e quella camera-sorgente luminosa (cioè la *baseline*), questo deve essere mantenuto fra 1 e 5. Inquadrare aree molto lontane dalla camera di ripresa comporterebbe avere una linea di base talmente estesa – superando talora il metro di lunghezza – al punto che pare circostanza difficile da essere attuata praticamente. Ciò nonostante, soprattutto nel campo dei Beni Culturali, è stato messo in atto un eccezionale uso di sensori a triangolazione anche per applicazioni a monumenti di grandi dimensioni³⁶, tuttavia essi rimangono, comunemente, ottimi strumenti di rilievo 3D da impiegare per oggetti piccoli o medi (Fig. 7).

4.4 Sensori distanziometrici

Nel caso di opere o monumenti di grandi dimensioni, dell'ordine di metri o decine di metri – quali edifici, ponti, dighe, scavi, intere aree territoriali, etc. – per le operazioni di rilievo 3D si ricorre, in genere, a strumenti ottici che si-

ano capaci di misurare, con grande precisione, la distanza sul principio di tempo di volo, cioè 'la misura del tempo impiegato da una sorgente luminosa per andare dallo strumento all'oggetto da rilevare e tornare allo strumento'³⁷. Questi sono sensori ottici che, muniti di un distanziometro, riescono a misurare accuratamente la direzione di puntamento, prevedere l'invio di impulso laser e stimare la successiva misura del lasso di tempo che trascorre fra l'emissione luminosa, riflessa sulla superficie dell'oggetto, e il suo ritorno allo strumento di misura. Conoscendo la velocità della luce e moltiplicandola per metà del tempo di volo trascorso fra emissione e ricezione si ottiene la distanza dall'oggetto.

Tali scanner laser sono, quindi, strumenti ottici distanziometrici che consentono di effettuare misure fino a centinaia di metri, con precisioni sub-centimetriche, dunque in grado di acquisire punti distanti fino ad un chilometro, mantenendo la precisione del centimetro.

I sistemi che si basano sul principio di misura della distanza vengono anche detti *Laser Radar* o LiDAR, quale acronimo di *Light Detection And Ranging*³⁸, manifestando così la loro essenziale funzione di misura di distanza tramite la luce. La capacità dei LiDAR di lavorare ad ampia distanza rispetto alla superficie dell'oggetto o scena di rilievo fa sì che questi siano ampiamente impiegati per l'acquisizione 3D da piattaforme e veicoli in movimento (aereo, elicottero, barca, automobile, etc.) o in modalità statica (rilievo classico terrestre).

In sostanza la differenza fra questi due contesti consiste nel fatto che, mentre nell'ultimo il posizionamento dei dati geometrici in un unico sistema di riferimento avviene utilizzando dati ridondanti ed applicando un opportuno algoritmo di allineamento, nel primo caso si preferisce integrare lo scanner con un sensore capace di fornirne la posizione e l'orientamento.

Il rilevamento tramite sensori ottici *range-based* a tempo di volo – chiamati TOF, quale acronimo di *Time Of Flight* – è derivato dal principio di misura delle stazioni totali³⁹.

La definizione 'a tempo di volo' – come precedentemente citato – si riferisce al metodo utilizzato per stimare la distanza fra sensore e *target*, che di solito viene presa misurando il tempo impiegato dalla luce per andare dalla sorgente luminosa alla superficie dell'oggetto, e tornare al rilevatore di luce integrato nel distanziometro. Il tempo di

volò è, dunque, direttamente proporzionale alla distanza tra strumento e oggetto.

Uno strumento TOF è costituito, quindi, da una sorgente laser e un rilevatore, ovvero da un apparato opto-meccanico in grado di variare la direzione di puntamento del raggio emesso. Infatti esso contiene un motore in grado di cambiare, ad intervalli regolari di tempo, la direzione di puntamento, per cui, noto l'angolo di direzione, risulta possibile misurare l'intero oggetto automaticamente, grazie alla movimentazione meccanica della sorgente.

Pertanto, al contrario degli strumenti con teodolite⁴⁰, uno scanner laser TOF ha la capacità di riorientare automaticamente il laser su una serie predefinita di angoli orizzontali e verticali per selezionare una determinata area, posta di fronte allo strumento, senza esigere che un operatore traguardi con un mirino alcun punto specifico nello spazio. Invece di restituire delle stime angolari precise, tramite una serie di codificatori digitali, il laser TOF fornisce direttamente la distanza.

L'acquisizione delle coordinate 3D (x_A, y_A, z_A) di un generico punto A, appartenente alla superficie dell'oggetto, viene eseguita in funzione della distanza sensore-punto (ρ) e dell'orientamento del fascio laser tramite l'angolo azimutale (α) e quello zenitale (z). Mentre quest'ultimi due sono conosciuti *a priori* dal dispositivo opto-meccanico di orientamento del raggio laser, la distanza tra la sorgente e ed il punto A viene calcolata stimando il tempo di volo di un impulso luminoso dal sensore all'oggetto e viceversa.

Le tre coordinate sono quindi:

$$x_A = \rho \sin(z) \sin(\alpha) \quad [21]$$

$$y_A = \rho \cos(z) \quad [22]$$

$$z_A = \rho \sin(z) \cos(\alpha) \quad [23]$$

L'area rilevabile da una singola ripresa di uno scanner laser viene indicata con 'campo di acquisizione' e si esprime generalmente tramite un valore angolare relativo al piano verticale –ovvero 'l'altezza' del campo – ed uno al piano orizzontale, quasi sempre coincidente con la rotazione attorno ad un asse.

Per i sensori TOF, generalmente, il movimento angolare è tale da consentire un ampio campo di scansione, fino ai

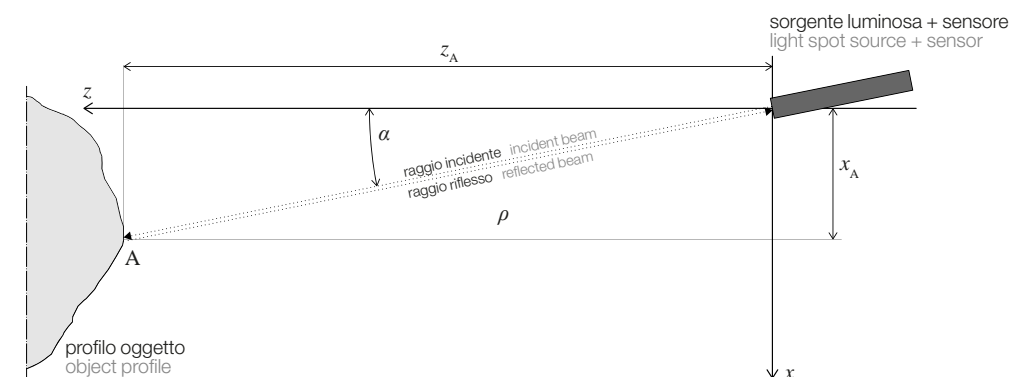
360° sul piano orizzontale e prossimo ai 270° su quello verticale⁴¹, quindi la registrazione di un enorme volume sferico anche da un'unica postazione fissa.

Analogamente ai sensori a triangolazione l'*output* è ancora una nuvola densa di punti 3D, originati da un campionamento spaziale ad alta risoluzione di una superficie, tuttavia rispetto ai primi la struttura dei dati acquisiti con scanner TOF è spesso differente. I dati registrati da quest'ultimi sono infatti raccolti campionando un settore angolare di una sfera, con un passo non sempre fisso. Pertanto il *set* di dati può risultare formato da linee di scansione non necessariamente tutte della stessa dimensione e, di conseguenza, l'*output* dello scanner può essere rappresentato da un semplice elenco di coordinate 3D, non strutturato in una matrice.

Nonostante i tempi di scansione, non sempre brevi, i campionamenti ottenuti dagli scanner TOF sono abbastanza densi e dell'ordine di un campione per cm².

Adoperando impulsi laser, tali strumenti hanno il vantaggio di trasmettere una notevole quantità di energia, in un breve intervallo di tempo, limitando così l'influenza del rumore di fondo, benché, per ottenere misure accurate della distanza, sia necessario ricorrere spesso ad impulsi molto brevi, che non possono quindi trasportare una grande quantità di energia.

Fig. 27 – Schema funzionale di uno scanner laser basato sulla stima del tempo di volo (TOF), quindi sul misurare otticamente la distanza sensore-target, conoscendo a priori di angoli attraverso l'orientamento controllato del dispositivo di misura range.



Dal punto di vista prestazionale, sebbene i possibili errori di misura risultino ascrivibili tanto all'accuratezza della stima angolare quanto alla misurazione della distanza, a causa dell'elevata velocità della luce, il tempo di volo è così breve che la sua stessa stima – quale fonte principale di casualità – si traduce in un'incertezza geometrica, una volta convertita in distanza⁴². D'altronde uno dei problemi maggiori degli scanner laser TOF consiste proprio nel determinare esattamente il momento di arrivo del segnale riflesso; la precisione nella misura della distanza viene di fatto influenzata dallo stesso strumento impiegato per la determinazione del tempo trascorso e dal tipo di processamento del segnale⁴³.

Avendo comunque un'incertezza di misura difficilmente inferiore ai 2 mm – quindi assai maggiore rispetto a quella dei sistemi triangolatori⁴⁴ – gli scanner laser a tempo di volo si sono confermati quale categoria sensori attivi da utilizzare essenzialmente per il rilievo 3D di oggetti di grandi dimensioni, per i quali un errore assoluto di qualche millimetro è relativamente piccolo⁴⁵.

La stima del tempo di volo – e perciò della distanza – può essere eseguita sia in modo diretto che indiretto. In funzione del ritardo di propagazione della luce laser, le modalità disponibili per misurare coordinate 3D sono tre: l'emissione sulla scena, da parte della sorgente, di impulsi laser o *Pulsed Wave* (PW) e la misura diretta dell'intervallo intercorso fra l'impulso inviato e quello ricevuto (tempo di volo); l'emissione sulla scena di una radiazione luminosa continua a frequenza fissa (*Continuous Wave*, CW) o a frequenza variabile (*Continuous Wave-Frequency Modulated*, CW-FM) e la misura indiretta del tempo di volo,

calcolando lo sfasamento – o l'insieme degli sfasamenti nel secondo caso – tra l'onda emessa e quella riflessa, e le corrispondenti alterazioni delle ampiezze.

In base a tali strategie è dunque possibile distinguere due classi di strumenti: gli scanner laser TOF ad impulsi (PW) che usano la stima diretta del tempo di volo, e quelli a frequenza continua CW o CW-FM che invece misurano in modo indiretto attraverso lo sfasamento, o gli sfasamenti, del segnale trasmesso e ricevuto.

D'altro canto gli strumenti che analizzano, per la misura della distanza, sia il tempo di volo che la cosiddetta differenza di fase (CW) sono sempre definiti scanner *range*, ossia distanziometrici.

In entrambi i sistemi la misura della distanza avviene in corrispondenza di direzioni azimutali e zenitali predefinite, generalmente secondo passi angolari costanti.

Di norma il raggio laser viene riflesso da un sistema di specchi rotanti. Le due soluzioni meccaniche adottate per alleggerire maggiormente le parti in movimento sono composte da una testa rotante che emette il laser e da uno specchio che ruota nella direzione ortogonale, o da un emettitore fisso e una coppia di specchi rotanti.

4.4.1 Scanner Laser a tempo di volo (PW)

Per tale tipo di sensori la stima della distanza si basa su un breve impulso (*pulsed wave*) di energia luminosa generata dalla sorgente in direzione del *target*/superficie. Parte di questa energia viene retrodiffusa al sensore, raccolta e riconvertita in un segnale elettrico da un fotodiode. L'impulso luminoso trasmesso e ricevuto viene utilizzato come comando di *start/stop* per un orologio digitale, ad alta frequenza, che permette di contare un numero di unità di tempo tra i due eventi. Ovviamente maggiore è la risoluzione temporale del contatore, migliore sarà la stima della distanza. Tuttavia, i limiti dovuti alla frequenza del conteggio elettronico non permettono di scendere al di sotto di qualche decina di ps, unità di tempo corrispondente ad alcuni millimetri⁴⁶.

La distanza percorsa dall'impulso luminoso (ρ) viene espressa come prodotto tra la velocità e il tempo, ovvero:

$$\rho = \frac{(\text{TOF} \cdot c)}{2} \quad [24]$$

dove (c) è la velocità della luce nel vuoto ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) e (TOF) è il tempo impiegato dall'impulso luminoso per andare sulla superficie e tornare fino allo strumento di misura (pari al doppio della distanza sensore-*target*).

La distanza (ρ) tra sorgente e target risulta, pertanto, la metà del percorso di andata/ritorno dell'impulso. Tale classe di strumenti risulta, dunque, per principio adatta a stimare distanze anche molto lunghe con un'intrinseca limitazione nella velocità di acquisizione e nella precisione che può andare da qualche decimetro a qualche millimetro. Nello specifico dalla [24] si deduce come tempi di percorrenza ridotti – rispetto alla velocità della luce – diano luogo ad una stima assai aleatoria del tempo di volo, quindi ad un'elevata incertezza sulla misura della distanza con valori 20-30 volte maggiori rispetto agli scanner triangolatori. Infatti una piccola deviazione nella stima del tempo di volo, ad esempio dell'ordine di 20 ps, darà una corrispondente deviazione *range*

$$\Delta\rho = \frac{1}{2} \cdot (20 \cdot 10^{-12}) \cdot (3 \cdot 10^8) \text{ m} = 3\text{mm} \quad [25]$$

Per alcuni modelli di scanner laser basati su questo principio⁴⁷ l'apparecchio è in grado di rilevare impulsi riflessi multipli da un singolo impulso trasmesso, fornito da situazioni in cui ci sono più *target* sulla traiettoria del laser (ad esempio una parete dietro le foglie di un albero). In questo caso, però, la nuvola di punti non è più un'entità 2.5D.

4.4.2 Scanner Laser a differenza di fase (CW)

Per questa classe di sensori la stima della distanza avviene tramite una luce laser la cui intensità è modulata in maniera sinusoidale ad una frequenza determinata, generando un'onda continua (CW) di energia luminosa in direzione del target. La riflessione sulla superficie di destinazione restituisce un'onda luminosa sinusoidale ritardata rispetto a quella trasmessa e quindi caratterizzata da una differenza di fase con questa. Analogamente agli scanner TOF PW, la stima della distanza si basa su un confronto tra il segnale applicato al laser per generare la radiazione luminosa trasmessa,

$$s_{TX} \cos(\omega_0 t) \quad [26]$$

e il segnale generato dalla riconversione in forma elettrica della luce riflessa dalla superficie e ricevuta dal sensore *range*,

$$s_{RX} = \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad [27]$$

Uno scanner laser CW, integrando elettronicamente i due segnali, pertanto implementa una moltiplicazione di questi due contributi. Esso risulta pertanto:

$$\cos(\omega_0 t) + \cos(\omega_0 t + \varphi) = \frac{1}{2} \cos(\omega_0 t) + \frac{1}{2} \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad [28]$$

Il risultato è un contributo doppio della frequenza di modulazione, che può essere tagliato attraverso un filtro passa-basso, e la stima di un contributo continuo, direttamente proporzionale alla differenza di fase (φ). Poiché tale valore angolare è direttamente proporzionale al tempo di volo, da questo valore l'intervallo può essere stimato analogamente agli scanner laser ad impulsi PW.

La stima indiretta del TOF permette una migliore performance in termini di incertezza per due ragioni principali: (1) la luce inviata al *target* è continua, perciò può essere trasmessa molta più energia rispetto agli scanner laser PW e il conseguente rapporto segnale-rumore ricevuto è superiore; (2) il tipo di filtraggio (passa-basso) necessario per estrarre la componente di segnale utile, comporta un taglio anche del rumore ad alta frequenza, con la conseguente ulteriore riduzione del rumore rispetto al segnale.

Un aspetto peculiare di questa tecnica di misura *range* è la possibilità di avere un'informazione ambigua se la distanza sensore-superficie è maggiore della lunghezza equivalente di un'intera onda luminosa modulata, data dall'intervallo (*range*) di ambiguità ($r_{amb} = \pi c / \omega_0$), dipendendo dalla ripetizione della fase. Tale ambiguità di segnale luminoso comporta una distanza massima di funzionamento e di alcune decine di metri⁴⁸, che per gli apparecchi CW, in generale, è minore rispetto a quelli PW.

4.4.3 Scanner laser FM-CW

Nei sistemi a differenza di fase (CW) l'esigenza di una lunghezza d'onda sufficientemente ampia per evitare am-

biguità, influenza le prestazioni del rilievo, tanto migliori quanto la lunghezza d'onda è breve (cioè come cresce ω_0). Ciò ha portato a soluzioni a radiazione luminosa continua CW in cui vengono impiegate due o tre differenti frequenze di modulazione: una frequenza bassa per un intervallo di ambiguità ampio (dell'ordine di 100 m), frequenze più brevi per accrescere la risoluzione angolare (e quindi l'intervallo). Aumentando indefinitamente il numero di passaggi tra frequenza di modulazione bassa e alta, viene generata una frequenza detta *chirp* (FM), con una crescita lineare della frequenza di modulazione nell'intervallo di funzionamento. Dal momento in cui la radiazione luminosa viene generata di continuo tali strumenti sono indicati come FM-CW tuttavia, dato che questo metodo è utilizzato normalmente dai radar, essi sono conosciuti anche come *radar laser*.

L'aspetto peculiare di questo approccio consiste proprio nella sua capacità di ridurre l'incertezza di misura a livelli notevolmente inferiori di quelli raggiunti, rispettivamente, con scanner laser PW (tipicamente 2-3 mm) o con apparecchi CW (meno di 1 mm per alcuni materiali).

Entrando così in competizione con scanner laser a triangolazione gli scanner laser FM-CW consentono di raggiungere un'incertezza di misura inferiore a 100 μm ed hanno, quindi, il vantaggio di un'attrezzatura di acquisizione sferica, tipica degli scanner laser a tempo di volo, con performance metrologiche paragonabili a quelle degli strumenti a triangolazione, a distanze di funzionamento (da 1 a 20 metri) molto più grandi rispetto al tipico funzionamento degli scanner a triangolazione (da 0,5 a 2 metri).

Per tale motivo gli strumenti FM-CW sono stati sperimentati in applicazioni in cui sono richieste, contemporaneamente, ampia area ed alta precisione di intervento, come nel caso di quelle industriali⁴⁹ e nel campo dei Beni Culturali.

La precisione ottenibile tramite sensori FM-CW è elevatissima, addirittura migliore di un decimo di millimetro, ma per contro il sofisticato livello di elaborazione del segnale impiegato ne determina un costo particolarmente alto, oltre che tempi piuttosto lunghi, seppure mantenendo un *range* di lavoro limitato a poche decine di metri.

4.5 Caratterizzazione metrologica degli scanner 3D

Quando un sensore *range* deve essere scelto per rilevare la geometria della forma di un oggetto, indipendentemente dalla sua dimensione, la questione da affrontare – *in primis* – riguarderà quale livello di dettaglio debba essere fornito nel modello digitale 3D finale, costruito a partire da dati 3D grezzi, e quale tolleranza risulti accettabile tra l'oggetto reale e la sua copia digitale. Tali questioni sono così importanti da influenzare tutte le scelte tecnologiche e metodologiche dell'intero progetto di acquisizione 3D. Del resto un procedimento di rilievo tridimensionale include 'non solo metodi per l'estrazione dei dati relativi a superfici 3D, ma anche l'algoritmo di processo in grado di trasformare l'insieme di dati con coordinate calibrate, le caratteristiche misurate e i modelli o misure che possono essere visualizzate'⁵⁰.

L'estensione dei concetti metrologici, tipici delle metodiche di rilievo tradizionali, ai sensori *range* adoperati diviene, quindi, un obiettivo fondamentale ai fini di operazioni di registrazione e ricostruzione tridimensionale, affidabili e metrologicamente corrette. La definizione delle prestazioni complessive del sistema di misura riguarda innanzitutto 'la tipologia di strumento e i relativi parametri di rilievo [...] ed è dettata da un'analisi critica di dimensione, geometria, posizione e materiale del manufatto' studiato e, quindi, dalla sua complessità'⁵¹.

D'altra parte se la garanzia di affidabilità del risultato per gli strumenti passivi, come i teodoliti o le macchine fotogrammetriche, viene convalidata attraverso la prassi di calibrazione ed una requisiti metrologici precisi, ciò deve essere esteso anche agli apparecchi *range*. I precedenti aspetti, infatti, 'influenzano direttamente in dato "grezzo" prodotto dalla misura spaziale, e la mancanza di una piena consapevolezza di essi da parte del rilevatore può condurre ad errori considerevoli nella pianificazione e nella realizzazione del rilievo'⁵².

La qualità dei sensori 3D posti all'interno dei sistemi laser, sia triangolatori che a tempo di volo, è condizionata da fattori molteplici – come le caratteristiche opto-elettroniche, la meccanica strumentale, gli algoritmi di funzionamento, etc. – che incidono, in modo diretto, sulle prestazioni e la caratterizzazione metrologica dello strumento, ossia sui principali parametri della misurazione tridimen-

sionale⁵³: risoluzione geometrica, accuratezza e precisione, o incertezza di misura⁵⁴.

4.5.1 Risoluzione geometrica

La risoluzione – quale 'più piccola variazione in una quantità misurata che determina un sensibile cambiamento dell'indicazione corrispondente'⁵⁵ – una volta riferita all'acquisizione 3D senza contatto, viene intesa come dettaglio geometrico minimo che lo strumento *range* è in grado di catturare. Quindi valore che, influenzato dalle caratteristiche meccaniche, ottiche ed elettroniche del dispositivo impiegato, rappresenta la risoluzione massima consentita dal sensore 3D.

Da un punto di vista pratico, essa viene definita tramite la densità della nuvola di punti impiegata per rappresentare la realtà, è risulta quindi da due caratteristiche tecniche: le dimensioni dello spot laser e la capacità di incrementare di piccole quantità l'angolo degli elementi di rilevazione (specchi, prismi, parti meccaniche) dello strumento impiegato⁵⁶. Per la sua natura tridimensionale, il parametro di risoluzione può essere suddiviso in due componenti: la risoluzione assiale, lungo l'asse ottico dello strumento (di solito indicato come z), e la risoluzione laterale, sul piano xy ⁵⁷. Per catturare digitalmente una forma, il sensore 3D genera una discretizzazione continua della sua superficie secondo un passo di campionamento predefinito, regolabile da parte dell'utente finale, anche ad un livello inferiore rispetto a quello massimo. L'adeguamento comporta una corretta spaziatura fra la campionatura geometrica sul piano xy , fornendo il livello di risoluzione geometrica effettiva scelta dall'operatore per quella specifica acquisizione 3D. Il valore corrispondente in z è una conseguenza dell'attrezzatura ottico-geometrica, e quindi normalmente non può essere cambiato dall'operatore.

In altre parole deve essere fatta una chiara distinzione tra la risoluzione massima consentita dal sensore, spesso indicata come 'risoluzione laterale' nella sua relativa scheda tecnica, e la risoluzione effettivamente utilizzata per un lavoro di acquisizione 3D, che l'utente finale può correttamente adeguare a seconda della complessità geometrica dell'oggetto 3D da rilevare, operando sul passo di campionamento xy .

Tale impostazione risulta comunque influenzata dalla lunghezza focale dell'obiettivo e dalla distanza sensore/superficie per gli strumenti a triangolazione, utilizzando un sensore di *imaging* le cui dimensioni e densità di *pixel* sono già note. In tal caso il passo di campionamento sarà ottenibile – per esempio – dividendo la dimensione orizzontale dell'area contenuta per il numero di *pixel* orizzontali. Dal momento in cui la maggior parte delle macchine fotografiche possiedono *pixel* quadrati, generalmente questo valore è equivalente a (dimensione verticale)/(numero di *pixel* verticali).

Per gli scanner laser a tempo di volo (TOF) il campionamento può essere impostato sul *software* di controllo dello strumento impiegato, definendo il passo angolare tra due punti adiacenti su una linea di scansione, e fra due linee di scansione adiacenti. Naturalmente, al fine di convertire il passo angolare in una fase lineare sulla superficie, tale angolo, espresso in radianti, deve essere moltiplicato per la distanza di funzionamento. Alcuni pacchetti di controllo dello scanner consentono di impostare direttamente il valore precedente.

Il campionamento dovrebbe essere eseguito seguendo una regola derivante direttamente dal teorema del campionamento di Nyquist-Shannon⁵⁸, sviluppato inizialmente nell'ambito della teoria dei segnali e delle telecomunicazioni. Tale teorema stabilisce che, se un comportamento sinusoidale ha una frequenza definita dal suo periodo T – intervallo che nel dominio geometrico diventa una lunghezza, cioè la dimensione del dettaglio geometrico più piccolo che intendiamo catturare digitalmente – il passo di campionamento minimo, per consentire la ricostruzione dello stesso comportamento, è uguale a $T/2$. Generalmente, benché non sia vero che i minimi dettagli geometrici di una forma complessa possono essere considerati come composti dall'estruzione di profili sinusoidali, questo criterio fornisce almeno una 'regola del pollice'⁵⁹ per stimare un passo minimo di campionamento geometrico, al di sotto del quale ogni dettaglio inferiore verrà perso.

4.5.2 Accuratezza

Il Vocabolario VIM definisce tale termine quale grado di 'concordanza tra un valore misurato (risultato di una misu-

razione) e un valore vero di un misurando'⁶⁰. Non essendo quindi una grandezza – ma piuttosto un'entità teorica – all'accuratezza non viene assegnato alcun valore numerico; cosicché quando essa deve essere valutata per uno strumento reale, come un sensore 3D, il suo valore deve essere sperimentalmente stimato sull'*output* prodotto.

Del resto ogni volta che si esegue una misurazione di una distanza, di un peso di un qualsiasi altro parametro fisico, ciò che viene misurato ne rappresenta solo un'approssimazione, non corrispondendo mai esattamente al dato reale. È possibile, dunque, ritenere una misurazione 'tanto più accurata quanto minori sono gli errori di misura che la caratterizzano'⁶¹.

Di conseguenza tale concetto è collegato a quanto viene definito nel medesimo 'dizionario' per 'giustezza', ossia il grado di concordanza – invece – 'tra la media di un numero infinito di valori misurati ripetuti e un valore di ri-

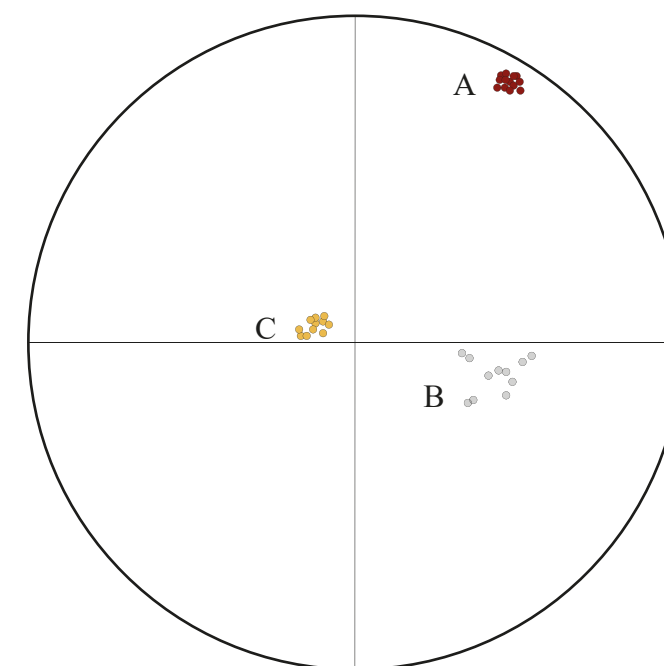


Fig. 28 – Esempio per spiegare i concetti di accuratezza e precisione. Il target è stato mirato da tre diversi tiratori: il primo (A) è stato preciso ma non accurato, il secondo (B) più accurato rispetto al precedente ma meno preciso, mentre il terzo sparatore (C) si è dimostrato sia preciso che accurato.

ferimento⁶². Quest'ultima è un parametro più pratico che può essere numericamente stimato come la differenza tra un valore 3D assunto come vero (perché misurato con un metodo molto più accurato) e la media di un numero sufficientemente elevato di campioni acquisiti attraverso lo strumento *range* da caratterizzare. La giustezza si riferisce, quindi, alla componente sistematica dell'errore di misura rispetto ai dati reali e può essere minimizzato attraverso una taratura del sensore.

Il parametro dell'accuratezza, rappresentando l'errore di misura di una quantità e il suo valore vero (o valore accettato vero) è, in altri termini, la variazione che si sovrappone sistematicamente ai dati relativi e che – diversamente dalla componente casuale di precisione – non è facilmente rilevabile, poiché il dato acquisito ed eventualmente mediato dovrebbe essere confrontato con un campione di misura, e non semplicemente con la sua media⁶³.

Per i sensori 3D l'accuratezza può essere valutata per entrambe le direzioni, assiale (*z*) e laterale (sul piano *xy*). In generale, la più importante è l'accuratezza relativa alla profondità, questa varia da pochi centesimi a qualche decimo di millimetro per sensori laser a triangolazione e scanner FM-CW, mentre è dell'ordine di 1-2 mm per quelli CW, di 2-20 mm per quelli PW.

4.5.3 Precisione e incertezza di misura

La parte dell'errore di misura ascrivibile a variazioni aleatorie e, perciò, nemmeno correggibili da un processo di taratura, si definisce come 'precisione', o più appropriatamente come 'incertezza di misura'. Tale caratteristica richiama da subito la capacità di definire i dettagli ed è relativa al grado di convergenza della misura con il valore reale presunto, ovvero con la media di riferimento.

Nello specifico la precisione è il grado di 'concordanza tra indicazioni o valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso oggetto, o di oggetti simili, eseguite in condizioni specificate'⁶⁴.

Dal punto di vista pratico un modo per stimare tale convergenza è calcolare la dispersione dei valori di quantità attribuiti ad un misurando attraverso la deviazione *standard* dei valori misurati rispetto alla loro media (o un multiplo di essa), definita dal VIM come l'incertezza⁶⁵. Come l'ac-

curatezza è influenzata da errori sistematici, la precisione è principalmente influenzata da errori casuali, portando ad un certo livello di imprevedibilità del valore misurato, per via del rumore termico nel rilevatore del sensore e, in caso di strumenti laser, per il tipico effetto *laser speckle*⁶⁶.

In linea di principio la precisione non ha comunque un limite e, quindi, è possibile approssimarla all'infinito; di fronte alle molteplici fonti di errore per i sensori 3D e considerando l'aleatorietà della grandezza⁶⁷ – quindi la sua non misurabilità – l'operazione che ha senso condurre per ottenere comunque una sua caratterizzazione di precisione è uno studio teorico che riesca a descriverne la variabilità tra misure differenti. L'applicazione di tale studio può consistere in una forma di *test*, nota *a priori*, iterando molte volte il processo di misura e valutando gli scostamenti di rilievi di *test* rispetto al valore vero mediante una valutazione statistica⁶⁸. La larghezza di distribuzione dell'errore ottenuta – ovvero la deviazione *standard* – è il parametro che definisce l'incertezza di misura dello strumento, la quale risulta rappresentata dalla dispersione (σ) delle misure intorno alla loro media, consentendo di stimare la componente casuale dell'errore.

Così per un sensore 3D la stima di precisione può essere acquisita più volte nella stessa zona e analizzando il valore misurato di un punto specifico nello spazio come una variabile casuale di cui si calcola la sua deviazione *standard*. Tuttavia ciò comporterebbe – come dice Gabriele Guidi⁶⁹ – un numero enorme di acquisizioni 3D da ripetere (cioè da 10000 a un milione) al fine di poter considerare i dati statisticamente significativi. Per tale motivo un approccio più pratico – benché dal punto di vista teorico non troppo coerente con la definizione – consiste nell'acquisire la nuvola di punti di una superficie, la cui forma è nota in anticipo, e valutare la deviazione *standard* di ogni punto 3D rispetto alla forma ideale⁷⁰. Poiché una nuvola di punti può essere facilmente composta da milioni di punti, la significatività statistica è implicita.

La precisione degli strumenti di acquisizione 3D attivi varia di poche decine di micron (μm) per i sensori a triangolazione, con un incremento dello scarto quadratico della distanza sensore-*target*. Parametro che ha valori simili per gli strumenti FM-CW, con un cambiamento, però, molto meno significativo per la distanza, diminuendo per i laser PW, con valori non inferiori ai 2 mm senza variazioni si-

gnificative con la distanza, mentre per i quelli CW varia da meno di 1 mm fino a pochi millimetri, quanto più il sensore dista dalla superficie.

Per le applicazioni di modellazione il livello di incertezza del sensore *range* non dovrebbe comunque superare una frazione del passo di risoluzione per evitare difetti topologici nella maglia finale. Una buona regola è, quindi, quella di evitare che il livello di risoluzione sia minore all'incertezza di misura dello strumento *range* utilizzato.

4.6 Acquisizione e processamento dei dati

Il processo che definisce il passaggio dall'acquisizione del dato reale fino alla generazione del modello poligonale digitale prende il nome di *Reverse Modeling*, a sottolineare il processo inverso rispetto a quello che viene normalmente compiuto in fase progettuale dal modello (digitale e non) alla sua realizzazione fisica⁷¹.

La procedura di ricostruzione ottenuta tramite sensori *range* si articola in fasi successive, che prendono le mosse dalla pianificazione della campagna d'acquisizione e si concludono con il *texture mapping* del modello poligonale.

Così, ai fini dell'acquisizione dei dati 3D, la pianificazione del 'progetto di presa' si deve svolgere attraverso la raccolta di un numero di scansioni, ciascuna da punti di vista differenti, utili per coprire la superficie dell'intero oggetto di interesse. In funzione della complessità di quest'ultimo, delle sue caratteristiche materiche e geometriche, le scansioni possono variare per numero – dalle decine alle centinaia – e per strategia operative, esigendo a maggior ragione di una fase preventiva di programmazione, la quale, attraverso valutazioni *a priori*, si pone il duplice scopo di ottimizzare il processo e, nel contempo, prevederne le eventuali problematiche.

La scelta del numero di 'stazioni' da effettuare e la loro posizione dipende principalmente dalla geometria dell'oggetto che deve essere rilevato e non può certo prescindere, tuttavia, dalla tipologia di strumentazione impiegata. Così la quantità di lavoro da svolgere per rilevare la morfologia del bene in esame è collegata, *in primis*, alla sua complessità – da come le superfici si sviluppano nello spazio – e deve, comunque, tener conto della possibilità di muoversi intorno ad esso, controllando le caratteristiche ambientali

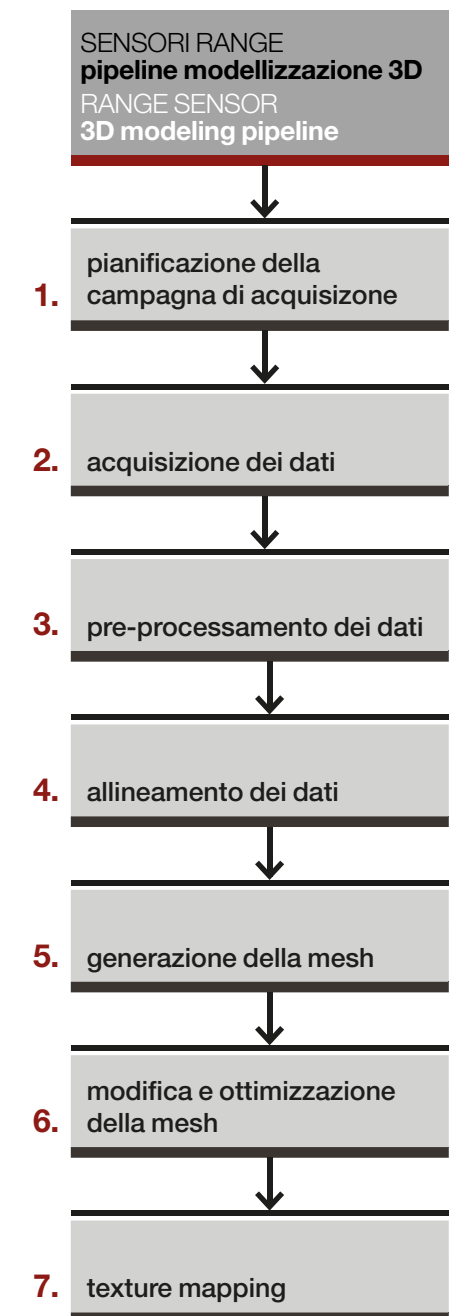


Fig. 29 – Pipeline del processo di modellazione 3D tramite sensori attivi: (1) progetto di rilievo e pianificazione della campagna di acquisizione; (2) acquisizione dei dati; (3) pre-processamento dei dati; (4) allineamento; (5) generazione della mesh; (6) modifica ed ottimizzazione della mesh; (7) texture mapping.

presenti. Durante la progettazione delle prese, infatti, non meno importanti saranno i fattori legati alla particolare tipologia dello strumento e alle condizioni ambientali nelle quali si svilupperà il rilievo⁷³; fattori che si aggiungeranno agli aspetti logistici generali e alla stessa analisi della forma dell'oggetto, al fine di evitare zone molto defilate che possono comportare la formazione di modelli non corretti⁷⁴. Sicuramente uno degli aspetti che può influenzare l'acquisizione 3D è costituito dalle condizioni di illuminazione, vista la frequente necessità di lavorare in ambienti esterni all'aria aperta, piuttosto che in locali chiusi dove i requisiti di luce possono essere maggiormente controllati. Nel primo caso, ad esempio, mentre i laser TOF non sono molto influenzati dalla luce solare diretta, i sensori *range* a triangolazione, invece, usando molto meno energia luminosa

per unità di superficie, danno risultati peggiori ad elevata luce ambientale, o addirittura nessuno⁷⁵. Per quanto concerne, inoltre, il posizionamento del sensore, nel caso di manufatti mobili e di piccola dimensione, questo può essere risolto agevolmente spostando lo strumento o il medesimo oggetto; mentre quando il manufatto in questione è molto grande e pesante, o fissato nel terreno (come un edificio), l'unica possibilità è spostare il sensore *range*. Talune volte, invece, il corretto posizionamento può richiedere l'impiego di ponteggi o piattaforme mobili, esigendo così di un relativo progetto logistico. In quest'ultimo caso è però fondamentale assicurarsi preventivamente della stabilità del supporto, poiché oscillazioni anche minime del sensore in fase di acquisizione comportano deformazioni irreversibili della *range map*.



Figg. 30, 31 – Foto acquisite in occasione della campagna di rilievo 3D dell'interno del Campanile del Duomo di San Martino a Pietrasanta (ricerca diretta dalla prof.ssa Barbara Aterini). La progettazione della campagna di acquisizione dati mediante l'utilizzo di ponteggi metallici per posizionare lo scanner a varie quote.

Nonostante l'acquisizione tridimensionale con uno scanner laser, di per sé, costituisca spesso uno dei passi più rapidi dell'intero processo, semplificando le operazioni di rilievo – quasi del tutto automatico – e permettendo di acquisire speditamente geometrie anche complesse, la preliminare fase di progetto di scansione deve essere eseguita con massima scrupolosità per una corretta campagna di rilievo⁷⁶. Del resto il fine ultimo del modello digitale di un oggetto reale, piuttosto che di un'intera scena, non può certo prescindere dalla pertinenza con cui la materia prima viene considerata per la pianificazione del progetto di acquisizione 3D. La peculiarità dell'oggetto da rilevare, assieme agli specifici requisiti di *output* finali, non vincolano, dunque, solo le scelte sul tipo di strumentazione da impiegare, ma ne determinano anche quelle per definire le modalità con cui effettuare il rilevamento; tutte scelte da operare inesorabilmente in questa prima fase di progetto digitale.

Nel corso stesso dell'acquisizione, comunque, possono essere sempre definiti nuovi punti di ripresa, secondo un approccio iterativo, volto ad ovviare evidenze e particolarità che dovessero appalesarsi sul campo.

Da un punto di vista pratico, affinché il lavoro di rilievo sia compiuto 'a regola d'arte' occorre, infatti, considerare alcuni requisiti fondamentali connessi alle circostanze in cui si esegue l'acquisizione stessa dei dati 3D. A partire dalla riduzione di ombre ed occlusioni nel posizionamento della *range camera*, al fine di garantirne una maggior visibilità, dalla verifica dell'angolo d'incidenza con cui il raggio laser del sensore colpisce la superficie oggetto del rilievo fino alla previsione di un'ampia sovrapposizione fra le scansioni⁷⁷ – oltre che all'omogeneità della loro risoluzione – in grado di coprire adeguatamente la geometria dell'intera superficie, l'attenzione dedicata nella prima fase di pianificazione e acquisizione 3D condiziona l'aspetto del modello finale⁷⁸. In tal modo il rilevatore pianifica l'acquisizione, ottimizzando le procedure secondo criteri di efficacia dei risultati, a vantaggio dei tempi di esecuzione e delle spese da prevedere, e stabilendo: il numero minimo e le posizioni dello scanner per costruire un modello completamente campionato⁷⁹; il passo teorico di scansione secondo la parte da acquisire⁸⁰; la procedura di unione per minimizzare il successivo errore di registrazione; l'integrazione con le altre tecniche ottiche 3D; etc.

Infatti per ogni punto 3D acquisito vengono registrate le tre coordinate cartesiane, le tre colorimetriche RGB – allorché lo scanner sia dotato di una fotocamera digitale o ne preveda l'integrazione – e, in alcuni casi, anche il valore della riflettanza.

Indipendentemente dalla tecnologia 3D attiva utilizzata l'esito finale di un'acquisizione tridimensionale è un modello costituito da punti che, correttamente distanziati in base alla sua complessità geometrica, descrivono l'oggetto tramite una codifica discreta di superfici, ovvero una nuvola di punti quale sua rappresentazione metrica⁸¹.

Del resto le applicazioni di modelli 3D possono spaziare da un semplice supporto per prestazioni multimediali fino ad un controllo dimensionale sofisticato. Nel primo caso è sufficiente una rappresentazione virtuale visivamente convincente dell'oggetto, mentre nel secondo è assolutamente obbligatoria una rigorosa corrispondenza metrica fra l'oggetto reale e la sua rappresentazione digitale.

Dal momento che i parametri come la precisione del modello globale e la sua risoluzione geometrica hanno un costo notevole in termini economici, sia per l'acquisizione dei dati che per la loro post-elaborazione, una scelta coerente con il *budget* del progetto e lo scopo finale rimane, comunque, una condizione imprescindibile.

In questa sorta di progetto esecutivo che garantisce il cliente circa la qualità delle strumentazioni utilizzate, delle procedure impiegate per l'acquisizione dei dati primari e la loro seguente validazione da un punto di vista di completezza, congruenza e precisione, oltre la copertura di tutta la superficie oggetto del rilievo, assume grande valore la facoltà di poter riferire ogni scansione ad un unico sistema di riferimento.

Ciascun dispositivo ha le proprie caratteristiche che, in funzione della distanza di presa, permettono, appunto, di prevedere l'ampiezza media della zona di oggetto ricoperta, nonché il numero medio di punti acquisibili. Operativamente, affinché sia garantita una completa copertura dell'oggetto, pare necessaria un'accurata progettazione delle direzioni di acquisizione.

Nello specifico, in caso di sistemi *range* fissi, il sistema di riferimento della scansione è solidale allo strumento stesso – e non esterno come quando si utilizzano *range camera* mobili⁸² – cosicché ogniqualvolta si sposta lo strumento si sposta anche il suo sistema di riferimento, determinando

che la definizione delle due scansioni eseguite in due differenti posizioni, avvenga in altrettanti differenti sistemi di riferimento non collegati fra loro.

Generalmente ogni nuvola di punti è acquisita rispetto al sistema di riferimento locale dello strumento, quindi riferita ad un sistema di coordinate avente l'origine nel sensore *range*. Ne consegue che acquisire i dati tridimensionali di un oggetto, o di una scena, da varie stazioni di scansione, significa raccogliere i dati 3D rappresentandone la stessa geometria da molteplici sistemi di riferimento, il cui orientamento reciproco è generalmente sconosciuto.

Il progetto delle acquisizioni dovrà, pertanto, pensare anche a quelle tecniche che verranno adoperate per la rototraslazione delle singole scansioni, ovvero quelle operazioni di allineamento (o registrazione) delle singole nuvole di punti in un unico sistema di riferimento; a partire dal loro principale requisito di operare su scansioni che siano in parte ricoperte – ovvero che abbiano ciascuna un'opportuna porzione di sovrapposizione – in modo da garantire il ritrovamento manuale o automatico, nelle zone comuni, di una serie di coppie di punti omologhi (in genere almeno tre fra due nuvole di punti)⁸³.

Una volta conclusa l'acquisizione dei dati 3D con un sensore *range*, e comunque prima dell'eventuale allineamento globale finale delle varie scansioni registrate⁸⁴, occorre considerare che dal momento in cui uno scanner laser acquisisce milioni di punti senza alcun tipo di interpretazione e comprensione preventiva dell'opera, la cui materialità viene quindi registrata acriticamente, si pone il problema della pulitura (*trimming*) delle nuvole di punti acquisite da quanto appare non pertinente all'oggetto d'interesse.

Nella maggior parte dei casi, infatti, gli strumenti *range* acquisiscono, oltre all'oggetto proprio del rilievo, punti che non sono necessari ai fini della creazione del modello (vegetazione, segnali, supporti, ostacoli, passanti, etc.). Occorre dunque occuparsi di migliorare la medesima gestione del modello metrico, acquisito in una fase di pre-processamento, dove rimuovere i dati incoerenti con la geometria reale – i quali potrebbero compromettere la qualità dell'allineamento – e procedere con una prima diminuzione del numero dei punti 3D; ricampionare la nuvola rendendo omogenea la distribuzione dei punti; filtrare i dati riducendo od eliminando gli eventuali artefatti di misura⁸⁵ ed effetti di disturbo⁸⁶.

4.7 Allineamento delle nuvole di punti

Il prodotto acquisito da ogni singola scansione è una *range map* riferita inizialmente al sistema intrinseco dello scanner. È quindi necessario allineare tali 'tessere di mosaico' e congiungerle in modo accurato per ricomporre l'intero oggetto rilevato⁸⁷.

Lo scopo della fase di allineamento consiste nel rintracciare la relazione spaziale corretta fra le nuvole di punti acquisite, relative ad un oggetto ripreso da vari punti di vista, in modo da rappresentarle in un unico sistema di riferimento. In altri termini si dovranno definire i parametri delle trasformazioni geometriche utili per esprimere le coordinate delle varie riprese sulla base di una vista scelta come riferimento globale. È possibile condurre il processo di allineamento utilizzando diverse tecniche le quali, a seconda dello strumento utilizzato per l'acquisizione dell'oggetto o della scena rilevati, possono essere classificate in funzione del tipo di corrispondenza stabilita, del metodo utilizzato per computare le rototraslazioni, della robustezza e della successiva strategia di registrazione⁸⁸.

La fase di allineamento viene generalmente suddivisa fra una registrazione preliminare (*coarse registration*), in cui eseguire un allineamento su coppie di scansioni, identificando almeno 3 punti omologhi per calcolare la prima rototraslazione fra i due sistemi di riferimento, ed il suo successivo affinamento (*fine registration*)⁸⁹, attraverso il quale cercare la soluzione più accurata minimizzando le differenze fra tutti i punti delle nuvole.

In definitiva il processo di allineamento può essere eseguito secondo tre approcci metodologici differenti: in base a *target* posizionati sulla scena acquisita dalle diverse scansioni, secondo particolari naturali riconoscibili fra nuvole adiacenti tramite l'algoritmo ICP (o sue varianti); guidato da sensori esterni capaci di fornire allo scanner laser la propria posizione e l'orientamento⁹⁰.

4.7.1 Allineamento basato su target di riferimento

Un approccio consiste nel guidare l'allineamento secondo particolari punti di riferimento efficacemente posizionati sulla scena. Questi *target* possono essere acquisiti e riferiti al sistema di coordinate locali della scansione, soprattutto

quando le loro caratteristiche di riflettanza, diffusività e forma sono note *a priori* e, quindi, il loro riconoscimento può avvenire in modo semiautomatico per opera dei medesimi *software* che gestiscono il sistema di acquisizione. Tuttavia essi possono essere anche misurati (o battuti) con un altro strumento come, ad esempio, una stazione totale, in modo da essere definiti in un sistema di riferimento globale⁹¹. Infatti in tale caso l'operatore registra, durante la campagna di acquisizione 3D, scene contenenti almeno tre target, cosicché quest'ultimi risultino rappresentati nel sistema di riferimento dello scanner laser per quella particolare posizione. Essendo poi note le relative posizioni nel sistema di riferimento globale, le loro coordinate possono essere utilizzate per calcolare la matrice di rototraslazione, necessaria a riorientare la nuvola di punti dal suo sistema di riferimento originale a quello globale realizzato con l'appoggio topografico.

L'operazione viene così ripetuta fino all'allineamento di tutti i dati 3D della scena. Tale approccio viene frequentemente usato con gli scanner laser a tempo di volo, in virtù della loro vasta area di interesse, per registrare volumetrie articolate e strutture di grandi dimensioni complesse. Tuttavia se da una parte l'impiego di *target* per la registrazione risulta efficiente sia dal punto di vista metrico che per rapidità con cui spesso i *software* calcolano la matrice di rototraslazione necessaria, dall'altra è essenziale che la distribuzione spaziale dei punti di riferimento sia uniforme in tutta la scena.

4.7.2 Allineamento basato su features naturali (ICP)

L'approccio che utilizza come riferimenti le caratteristiche naturali 3D (*features*) presenti nella scena fornisce per la fase di allineamento una soluzione alternativa e – in un certo senso – simile alla quella che usa invece come riferimenti i *targets*.

In questo secondo approccio la registrazione dei dati viene svolta attraverso l'applicazione di algoritmi semi-automatici o automatici – fra questi il più diffuso è sicuramente l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*)⁹² – che implicano la scelta iniziale di una nuvola di punti il cui sistema di coordinate venga utilizzato come riferimento globale.

La procedura di allineamento generalmente adottata si suddivide fra una registrazione preliminare (*coarse registration*) ed il suo successivo affinamento (*fine registration*)⁹³ attraverso il quale cercare la soluzione più accurata minimizzando le differenze fra tutti i punti delle nuvole.

Così, inizialmente, viene eseguito un pre-allineamento, manuale o automatico, su coppie di scansioni adiacenti – a partire da quella scelta come base di riferimento si accoppiano a cascata le varie *range maps* – identificando almeno 3 punti omologhi nelle porzioni comuni ad entrambe, in modo da calcolare la prima rototraslazione fra i due sistemi di riferimento; mentre nella attraverso il quale cercare la soluzione più accurata minimizzando le differenze fra tutti i punti delle nuvole. Nella seconda fase, quella della registrazione vera e propria invece, la stima approssimata viene raffinata applicando un algoritmo che iterativamente ricomputa i parametri della trasformazione, riducendo via via la distanza fra i punti omologhi.

Tale passaggio consente di avviare, pertanto, un processo iterativo per ridurre al minimo la distanza media fra i due *set* di dati, iniziando da una situazione di allineamento approssimativo, non troppo lontano da quello ottimale, che può essere raggiunto dopo un numero di iterazioni maggiormente ampie quanto più grezza è la prima approssimazione. Non a caso la classe degli algoritmi impiegati per tale metodo di allineamento è chiamata '*Iterative Closest Point*'. Quindi, a differenza della registrazione che sfrutta i *targets*, in questo secondo approccio l'operatore non deve fissare nessun *targets* nelle scene, né tantomeno valutarli singolarmente. D'altro canto però, per ottenere un corretto allineamento, dovrà essere previsto ed ottenuto un notevole livello di sovrapposizione fra le nuvole di punti adiacenti, comportando così un'ampia ridondanza dei dati – generalmente fra il 30-40% per un'accuratezza elevata – ma anche l'allungamento del tempo di calcolo.

L'aspetto comunque più critico in questo approccio è costituito dal fatto che le nuvole di punti da allineare comunemente presentano campionamenti differenti della stessa superficie; di conseguenza non c'è un'esatta corrispondenza tra i punti 3D nei due sistemi di coordinate. A tale proposito sono state proposte diverse soluzioni per considerare la migliore e più corrispondente minimizzazione delle distanze euclidee tra punti – ma la ricerca esaustiva del punto più vicino può richiedere molto tempo – o di

quelle fra un punto e l'approssimazione piana della superficie al punto corrispondente sull'altra nuvola di punti. In entrambe i casi la funzione principale dell'algoritmo è un processo di minimizzazione non lineare, basandosi su una caratteristica non lineare, appunto, come una distanza. Per tale motivo la funzione di stima associata ha un comportamento caratterizzato da svariati minimi locali confusi, e la sua minimizzazione deve essere avviata, per convergere al minimo assoluto, da una regolazione preliminare abba-

Registration strategy	Linear								
	Iterative								
Robustness	Not defined/Other								
Motion Estimation	Eigenvalues								
	Least Squares								
	Surface								
Kind of Correspondence	Curves								
	Points								

Coarse Registration	Point Signature	Chua97	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Ho99							
		Chua00							
	Spin Image	Johnson99	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Carmichael99	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Huber99	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	PCA	Huber02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Chung		✓	✓				✓
		kim02		✓	✓				✓
	RANSAC-Based	kim03		✓	✓				✓
		Darces	Chen98	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Algebraic Surface Model	Hung99	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Tarel98		✓	✓				✓
	Line-based	Wyngaerd02		✓		✓	✓	✓	✓
		Stamos03		✓		✓	✓	✓	✓
Chen05			✓		✓	✓	✓	✓	
Genetic Alg	Brunnstrom96	✓		✓				✓	
	Principal Curvature	Feldmar94	✓		✓			✓	

Fine Registration	ICP	Besl92	✓		✓			
		Kapoutsis98	✓	✓	✓			
		Yamany98	✓		✓			
		Trucco99	✓		✓		✓	
		Greenspan01	✓		✓			
		Jost02	✓		✓			
		Sharp02	✓		✓			
	Chen	Zinsser03	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Chen91	✓		✓			
		Gagnon94	✓		✓			
		Pullii99	✓		✓			
	Signed Distance Fields	Rusinkiewicz01	✓		✓			
		Masuda01		✓		✓		✓
		Masuda02		✓		✓		✓
	Genetic Algorithms	Chow03	✓		✓			✓
Silva04		✓		✓			✓	

Registration strategy	Pair-wise registration				
	Multi-view registration				
Efficient search	k-d trees				
Minimization distance	distance point-point				
	distance point-plane				
	Robustness				

stanza vicina alla soluzione finale. Una volta allineate le prime due nuvole di punti di una serie, ad esempio, il metodo ICP può essere applicato alle altre nuvole adiacenti fino alla copertura completa della superficie o dell'area di interesse. Questo allineamento a coppie progressivo può portare comunque ad una notevole propagazione degli errori, chiaramente evidente su superfici chiuse quando la prima nuvola di punti deve essere collegata con l'ultima. Per tale ragione sono state concepite versioni di ICP globali, dove l'orientamento di ogni nuvola di punti viene ottimizzato rispetto a tutte le nuvole vicine⁹⁴. Negli ultimi due decenni sono stati sviluppati diversi perfezionamenti di tale metodo per l'allineamento a coppie, con l'introduzione di parametri non geometrici aggiuntivi come il colore, per risolvere l'allineamento di oggetti con ricco contenuto d'immagine, ma con modesta struttura 3D – superfici piane o con *textures* regolari – oltre che per gestire gli eventuali cambiamenti della forma fra diversi scatti dovuti ad oggetti non rigidi. Di recente è stato proposto anche un *test* quantitativo per un diverso algoritmo di allineamento, in termini di *performance* metrica e per il tempo di elaborazione⁹⁵.

Fig. 32 – La tabella mostra la classificazione dei metodi di registrazione 'fine' in termini di: (a) strategie di registrazione; (b) uso di un metodo di ricerca efficiente, come ad esempio quello *k-d trees* in grado di ridurre i tempi di calcolo dell'algoritmo; (c) metodi di calcolo della minimizzazione delle distanze, che possono essere punto-punto o punto-piano; (d) metodi per calcolare le roto-traslazioni ad ogni iterazione; (e) robustezza del metodo. La strategia di registrazione può essere variare a seconda che l'allineamento di tutte le prese sia realizzato contemporaneamente (*multi-view registration*) o a coppie di immagini ad ogni iterazione (*pair-wise registration*) (Cfr. J. Salvi, C. Matasch, D. Fofi, J. Forest, *A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation, in Image and Vision Computing, vol. 25, n. 5, 2007*).

4.7.3 Allineamento basato su strumenti complementari

Tale approccio richiede la misurazione della posizione e dell'orientamento dello scanner laser usato con uno strumento di misurazione 3D complementare, come una macchina CMM, il cui sistema di coordinate – quello cioè dove vengono registrati i dati richiesti – viene assunto come riferimento globale. Le sei informazioni registrate relative alla posizione ed all'orientamento dello scanner possono essere, così, utilizzate per il calcolo della matrice di roto-traslazione dal sistema di coordinate dello scanner a quello globale.

L'applicazione sistematica di tale roto-traslazione, ad ogni punto 3D misurato dallo strumento laser, permette di trovare subito la loro rappresentazione nel sistema di riferimento globale, anche per diversi orientamenti dello scanner rispetto al *target*/superficie. Benché il volume di lavoro sia limitato dal posizionamento dello strumento complementare, tale approccio è molto preciso. Infatti esso viene utilizzato per strumentazioni in applicazioni industriali ad alta precisione, con bracci articolati (CMM a contatto) o *laser tracker* (CMM senza contatto) accoppiati con teste di scansione a triangolazione che riescono ad ottenere accuratèzze migliori rispetto a 10 micron.

Nel caso, invece, di sensori attivi ottici a lungo raggio (ad esempio gli scanner laser a tempo di volo) il dispositivo complementare può essere costituito da un GNSS⁹⁶ che – per ogni acquisizione – viene usato per misurare la posizione del sensore *range* in un sistema di riferimento globale, abbinato ad un sistema GPS/INS (*Inertial Navigation System*) il quale fornisce il suo orientamento angolare con, al massimo, accuratezza centimetrica.

4.8 Generazione del modello poligonale

Una volta ottenuta una nuvola di punti da un insieme di scansioni allineate, per ottenere una superficie occorre applicare al modello discreto una trasformazione. Di fatti, generalmente, la fase successiva consiste nella generazione di un'unica superficie poligonale (*mesh*). Tale fase di ricostruzione rappresenta la transizione dal modello discreto della *range map* a quello poligonale continuo che

– analogamente a quanto già descritto per la pipeline di modellazione 3D con sensori passivi (vedi par. 3.5.5) – è composto da una maglia di poligoni interconnessi, i cui vertici sono i punti acquisiti.

Può accadere che nel modello poligonale, prodotto mediante la fusione delle differenti scansioni e la successiva creazione della *mesh*, si presenti un certo rumore, spesso deviazioni, lacune o anomalie topologiche che – dovute ad esempio a zone d'ombra non raggiunte dalle scansioni acquisite – possono essere rimosse.

Si pone, in altri termini, la necessità di ridurre i punti ridondanti o ricampionare la loro stessa distribuzione in modo uniforme con talune operazioni di filtraggio, avendo massima attenzione – specie in ambiti come quello archeologico, dove la fedele ricostruzione del manufatto è sempre finalizzata alla seguente interpretazione – di preservare la geometria e la forma originale, senza eliminarne l'importante dettaglio. Per tale problema, estremamente aleatorio, negli ultimi sono stati proposti svariati algoritmi di computazione⁹⁷.

Il processo di generazione della *mesh* è logicamente suddiviso in diverse sotto-fasi che possono essere completate in ordine diverso a seconda del sistema di scansione 3D.

Del resto, durante tale fase, un fattore fortemente incidente è l'organizzazione dei punti che è stata ottenuta della sorgente dei dati 3D ed in relazione alle sue modalità di funzionamento. Infatti, in base a tale organizzazione, è possibile subito distinguere due categorie di nuvole di punti: quelle 'strutturate' e quelle 'non strutturate'. Mentre la ricostruzione della superficie *mesh* nel primo caso è un passo molto semplice, per il secondo, invece, non risulta altrettanto immediato.

4.8.1 Generazione della mesh da nuvole di punti strutturate

La griglia spaziale regolare che caratterizza una nuvola di punti strutturata implica una conoscenza immediata della connessione potenziale *mesh* del vicino per ogni punto 3D, rendendo la generazione della *mesh* una procedura piuttosto semplice. Ciò significa che, una volta allineato un *set* di nuvole di punti, esso può essere facilmente trasformato in *mesh* prima di avviare la fusione finale.

Questo è ciò che viene eseguito, per esempio, nel pacchetto *software* di *Polyworks*, utilizzato per creare l'allineamento e la creazione della maglia poligonale. Per eseguire la successiva fusione, le *mesh* associate alle varie nuvole di punti debbono essere collegate fra loro. Questo può essere realizzato con due approcci diversi: partendo dal cosiddetto approccio *zippering*⁹⁸, che seleziona i poligoni nelle zone di sovrapposizione, rimuove i triangoli ridondanti e collega insieme – azione tradotta, appunto, col verbo inglese *zipper* – le *mesh*, cercando di mantenere la migliore topologia possibile.

È stata proposta una versione ottimizzata che utilizza diagrammi di Venn al fine di valutare il livello di ridondanza nelle zone di sovrapposizione delle superfici *mesh*⁹⁹. Altri approcci, invece, funzionano mediante la triangolazione dell'unione degli insiemi di punti, come l'algoritmo *Ball Pivoting*¹⁰⁰, che consiste prima nel lanciare una 'palla' immaginaria sugli insiemi di punti e, dopo, nella creazione di un triangolo per ogni terna di punti di appoggio della palla. Tutti i metodi basati su una scelta di triangoli da una certa *mesh* sulle zone di sovrapposizione possono ottenere criticità nel caso di un elevato numero di nuvole di punti sovrapposte.

Nel secondo approccio, invece, un algoritmo volumetrico che opera una suddivisione in *voxel* dello spazio modello, calcola una posizione media di ciascun punto 3D sulle aree di sovrapposizione e ri-campiona le *mesh* lungo le linee comuni della vista¹⁰¹. In tale caso le eventuali zone con un grande numero di nuvole sovrapposte vengono valutate in modo più efficiente rispetto all'approccio *zippering*, con una riduzione dell'incertezza di misura grazie al calcolo della media dei punti omologhi.

4.8.2 Generazione della mesh da nuvole di punti non strutturate

Quando la *range map* ottenuta non è strutturata – tipico caso dei sistemi laser a tempo di volo – i punti formano una griglia spaziale irregolare in cui il loro numero differisce per ciascuna linea di scansione; cosicché i punti di una medesima linea non avranno una distanza uniforme e quelli appartenenti a linee differenti non risulteranno allineati.

Di conseguenza, quando la nuvola di punti non è struttu-

rata, i punti 3D generati dalla scansione necessitano di un processo specifico prima di essere trasformati in *mesh*, ovvero dell'applicazione di algoritmi di ricostruzione, basati su criteri come quello di Delaunay¹⁰², i quali comportino una proiezione dei punti 3D su un piano o su un'altra superficie primitiva, individuando quelli con connessione più corta e generando un insieme di possibili triangoli, da ri-proiettare poi nello spazio 3D e da verificare topologicamente¹⁰³. Per tale motivo la generazione della *mesh* da nuvole non strutturate può consistere in: (a) la fusione delle nuvole di punti 2.5D¹⁰⁴, riducendo la quantità dei dati nelle aree sovrapposte e generando in tal modo una nuvola 3D completa con risoluzione uniforme; (b) l'operazione di *meshing* viene eseguita tramite procedure più complesse rispetto agli algoritmi basati sul principio di Delaunay.

Per quest'ultima fase, in particolare, i possibili approcci si eseguono 'interpolando' la superficie che costruisce una triangolazione con più elementi rispetto al necessario, eliminando poi i triangoli non coerenti con la superficie, oppure 'approssimando' le superfici dove il risultato è spesso una triangolazione di una funzione di aggiustamento di punti 3D grezzi.

4.9 Fase di modifica e ottimizzazione

Le operazioni di modifica della *mesh* – la cosiddetta fase di *editing* – permettono di correggere tutte le possibili incoerenze topologiche o imperfezioni, generate nel modello 3D dopo la ricostruzione della superficie poligonale.

In tale fase, così, si rende solitamente necessario l'intervento manuale dell'operatore – data ancora la bassa affidabilità delle procedure automatiche – al fine di eliminare le eventuali irregolarità della maglia, ricostruendo quelle parti della *mesh* che presentano lacune, spesso dovute ad operazioni svolte nelle fasi precedenti oppure ad una sostanziale assenza di dati 3D rilevati dal sensore.

Le operazioni comunemente condotte durante tale fase risultano, principalmente, finalizzate a: pulire la superficie *mesh* (*cleaning*) e cercare di correggere le anomalie topologiche (intersezioni fittizie fra angoli, normali invertite, bordi condivisi da facce molteplici, etc.); chiudere i buchi nella superficie causati dalle zone d'ombra (*filling*); ridurre il rumore tramite la lisciatura della superficie (*smoothing*)

evitando di intervenire sugli spigoli; etc.

Dunque, sebbene occorra sempre preservare il più possibile la geometria e la forma originale – soprattutto quando lo scopo del rilievo 3D è documentativo – frequentemente si rende necessario seguire una serie di fasi che conducono alla riduzione del rumore strumentale e all'eliminazione degli artefatti incoerenti – o comunque indesiderati – quindi, al miglioramento della qualità della stessa superficie poligonale¹⁰⁵.

A tal fine, infatti, stabilire la qualità topologica di una superficie, se ad esempio questa sia più o meno *two-manifold*¹⁰⁶ – ovvero se per ogni punto, la superficie è localmente omeomorfa a un disco (o a un semi-disco sul confine) – può assumere particolare importanza in questa fase, soprattutto in relazione ai requisiti finali di output.

A tale proposito, infatti, le operazioni di *editing* si rendono necessarie almeno per due scopi: (1) se il modello finale 3D è da utilizzare per presentazioni virtuali in tempo reale o per *renderings* statici¹⁰⁷, la mancanza di anche pochi poligoni non fornisce il necessario supporto ai fini della *texture* o per l'ombreggiatura del materiale, creando una cattiva impressione visiva e vanificando l'enorme sforzo di modellazione fatto fino a questo punto; (2) se il modello deve essere impiegato per generare copie materiali attraverso la prototipazione rapida, la superficie *mesh* deve essere continua, senza presentare – appunto – buchi, fratture o elementi mancanti¹⁰⁸.

Sono stati proposti vari approcci per creare *mesh* finali il più possibile coerenti con l'oggetto misurato, come le funzioni a base radiali (RBF)¹⁰⁹, la partizione dell'unità multi-livello¹¹⁰ o la diffusione volumetrica¹¹¹.

Quando si tratta di eseguire un rilievo 3D metrico e documentativo accurato di opere, quali quelle archeologiche, resta il fatto che qualsiasi operazione di *editing* della *mesh* effettuata, volta a recuperare lacune e correggere errori presenti nella superficie poligonale ricostruita, debba prestare massima attenzione a non aggiungere dati non esistenti al modello misurato, incorrendo altrimenti in risultati di *output* altrettanto incoerenti.

Nei casi applicativi, invece, in cui è compatibile una significativa semplificazione e riduzione della dimensione della *mesh* e viene richiesta una migliore gestione informatica del modello, è previsto un'ulteriore intervento di ottimizzazione finale.

In generale, infatti, la superficie *mesh* ottenuta dopo le fasi di generazione e di *editing*, ha una densità di punti che è definita – come già detto – dalla risoluzione geometrica impostata dall'operatore durante la procedura di acquisizione dei dati 3D adoperata.

Considerando che, con i sensori *range*, il livello di risoluzione necessario viene scelto per catturare i dettagli geometrici più piccoli, risultando di conseguenza ridondante per la maggior parte del modello, può essere richiesta una semplificazione selettiva del modello, finalizzata dunque a decimare il numero di poligoni senza modificare significativamente la sua geometria.

Infatti una decimazione della *mesh* che riduce progressivamente il numero di poligoni, eliminando alcuni nodi, può essere applicata fino al raggiungimento di un numero predefinito di poligoni¹¹², oppure per controllare la deviazione tra *mesh* semplificata e non, prevedendone l'arresto ad una soglia preassegnata. Se tale soglia è dell'ordine di incertezza di misura del sensore 3D questo tipo di semplificazione esegue una notevole decimazione, non influenzando praticamente le informazioni geometriche ottenibili dal modello¹¹³.

In aggiunta alle operazioni di decimazione delle aree sovra-campionate, in particolare per tutte quelle superfici in cui il raggio non è troppo piccolo, la fase di ottimizzazione del modello 3D può comunque prevedere il 'rinfittimento' della maglia mediante l'inserimento di nuovi vertici – e quindi nuovi poligoni – oppure di regolarizzare la superficie *mesh* (il cosiddetto *remeshing*) dopo le modifiche apportate nella fase di modifica, con la conseguente redistribuzione dei poligoni¹¹⁴.

4.10 Texture mapping e visualizzazione

Tale fase è analoga, in linea di principio, a quanto prodotto dai sensori ottici *image-based* (vedi par. 3.5.6) tuttavia, rispetto a questi, la maggior parte degli scanner 3D sono sprovvisti di una camera capace di acquisire immagini digitali ad alta risoluzione per la *texturizzazione* del modello geometrico. Non a caso la *range map* ottenuta da un sensore attivo differisce da quella ricostruita con la procedura *image-based* non per la densità di punti acquisiti ma per l'assenza del loro valore cromatico.

Indipendentemente dalla tecnologia implementata, il risultato prodotto da un sistema a scansione è costituito da una *range map*, ossia da una descrizione discreta 3D della superficie rilevata.

Analogamente ad un'immagine fotografica, la quale offre una rappresentazione 2D della scena, una *range map* è una rappresentazione 3D della scena dal punto di vista dello scanner, che acquisisce solo ciò che è visibile dalla sua posizione. Allo stesso tempo la sua capacità di catturare le informazioni relative alla radiometria risulta legata, non tanto alla tecnologia *range* impiegata quanto alla presenza di una fotocamera integrata. Quest'ultima offre, infatti, la possibilità di associare una *texture* al modello, sulla base di immagini acquisite durante la scansione dell'oggetto¹¹⁵. Infatti per quanto concerne l'aspetto quantitativo (geometrico) – in relazione ovviamente ai parametri di risoluzione e accuratezza definiti nel progetto di rilievo 3D – il modello poligonale ottenuto dopo le operazioni di *editing* costituisce una copia fedele della realtà rilevata. Per quanto riguarda, invece, il suo aspetto qualitativo occorre spesso aggiungervi le informazioni legate all'apparenza visiva, affinché esso possa rappresentare, oltre la forma, anche le caratteristiche di colore, trasparenza e finitura della sua superficie. In altri termini, dunque, occorre 'colorare' un modello tridimensionale realizzato con uno strumento che non acquisisce il colore. Quest'ultimo generalmente è ricavato da immagini riprese attraverso fotocamere esterne, o separate al sensore *range*, che vengono riproiettate, poi, sulla superficie del modello.

La qualità del modello che si ottiene mediante scansioni 3D, del resto, può essere considerata come la somma di aspetti differenti, alcuni dei quali legati *in primis* alle caratteristiche metrologiche della strumentazione impiegata, altri all'oggetto stesso – quindi alla sua completezza – altri ancora alle elaborazioni realizzate in seguito all'acquisizione¹¹⁶.

Per registrare la *mesh* con i dati del *set* di foto serve orientare le immagini attraverso l'individuazione di almeno una serie di punti omologhi, oppure utilizzando il metodo delle proiezioni UV¹¹⁷. Sfruttando, comunque, alcuni strumenti di elaborazione messi oggi a disposizione dai programmi avanzati di *mesh processing* – come *GPL MeshLab*¹¹⁸ – è possibile, partendo da una soluzione approssimata, il più possibile corretta, ottimizzare l'allineamento *mesh/imma-*

gine, considerando la correlazione tra geometria ed alcune caratteristiche visive (ad esempio le normali) senza dover cercare alcuna corrispondenza di punti¹¹⁹.

In ogni caso, la fase di *texture mapping*, consistendo proprio nell'applicazione di immagini 2D su una mesh 3D, è finalizzata alla visualizzazione foto-realistica del modello 3D finale ed alla sua interattività. In definitiva, il colore aggiunge informazioni a quella spaziale ed in certi casi consente di compensarne la riduzione, o addirittura di associare ad essa altre tipologie di dati¹²⁰.



Fig. 33 – Foto scattata durante la fase di acquisizione dati con strumento laser a triangolazione per il rilievo 3D della Stele di Vicchio, eseguito una volta che questa è stata restaurata.

Note

1. Gli strumenti attivi, normalmente impiegati per rilevare oggetti e produrre modelli 3D, in genere vengono chiamati *range camera*. Quando questi usano luce laser, in particolare, sono detti *laser-based* o 'scanner laser 3D'.
2. Cfr. F.I. Apollonio, F. Remondino, *Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), 'Modelli digitali 3D in archeologia...', op. cit., p. 95.
3. Tale problema, ad esempio, non si è mai presentato con le tecniche di rilievo metrico più tradizionali dove è sempre l'operatore umano che effettua una scelta del punto da acquisire secondo criteri logici di descrizione della forma (Cfr. F. Rinaudo, *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in F. Sacerdote, G. Tucci (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', ed. Alinea, Firenze, 2007, p. 16).
4. 'LASER' acronimo per '*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*'.
5. Albert Einstein (Ulma, 1879 – Princeton, 1955) fisico e filosofo tedesco. Premio Nobel per la fisica nel 1921 '*...per i contributi alla fisica teorica, in particolare per la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico*' è uno dei più importanti studiosi e pensatori del XX secolo. Nel 1905, ricordato come *annus mirabilis*, pubblicò tre articoli a contenuto innovativo, riguardanti altrettante aree della fisica, fra questi uno spiegava l'effetto fotoelettrico in base alla composizione della radiazione elettromagnetica di 'quanti' discreti di energia (poi denominati 'fotoni'), secondo il concetto di 'quanto' ipotizzato nel 1900 da Planck. Questo studio portò Einstein al premio Nobel per la fisica.
6. Nell'articolo '*Zur Quantentheorie der Strahlung* (sulla teoria quantistica delle radiazioni)'.
7. Max Planck, nato Marx Karl Ernst Ludwig Planck (Kiel, 1858 – Göttingen, 1947), fisico tedesco iniziatore della fisica quantistica. Nel 1900 si rese noto che gli scambi di energia nei fenomeni di emissione e di assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche avvengono in forma discreta, cioè proporzionale alla loro frequenza di oscillazione, secondo una costante universale, e non in forma continua, come sosteneva la teoria elettromagnetica classica. Nel 1901 Planck passò dall'ipotesi quantistica alla vera e propria teoria quantistica: gli atomi assorbono ed emettono radiazioni in modo discontinuo, per *quanti* di energia, cioè quantità di energia finite e discrete. In tal modo anche l'energia

- può essere concettualmente rappresentata, come la materia, sotto forma granulare: i quanti come *granuli* di energia indivisibili. La teoria gli valse il premio Nobel per la fisica nel 1918.
8. Rudolf Walter Ladenburg (Kiel, 1882 – New Jersey, 1952) fisico atomico tedesco.
9. Willis Eugene Lamb Jr. (Los Angeles, 1913 – Tucson, 2008) fisico statunitense, vincitore del premio Nobel per la fisica nel 1955, per '*le sue scoperte riguardanti la struttura fine dello spettro dell'idrogeno*'.
10. Robert Curtis Retherford (1912 – 1981) fisico americano che ha dato un apporto decisivo ai fini di una nuova comprensione dell'elettrodinamica quantistica.
11. Alfred Kastler (Guebwiller, 1902 – Bandol, 1984) fisico francese, nato in Alsazia, vincitore del premio Nobel per la fisica nel 1966, per '*la scoperta e lo sviluppo di metodi ottici per lo studio della risonanza hertziana negli atomi*'. Collaborando con Jean Brossel, portò avanti ricerche sulla meccanica quantistica, sull'interazione tra luce e atomi e sulla spettroscopia.
12. Charles Hard Townes (South Carolina, 1915 – 2015) fisico americano inventore del *maser* e del *laser*.
13. Gordon Gould (New York, 1920 – 2005) fisico americano a cui è riconosciuta parzialmente l'invenzione del *laser*.
14. Nikolay Gennadiyevich Basov (Usman, Russia 1922–2001) fisico sovietico, ha dato un contributo notevole nel campo dell'elettronica quantistica che ha portato poi allo sviluppo del *laser* e del *maser*.
15. Aleksandr Mikhailovich Prokhorov (Atherton, 1916 – Mosca 2002) fisico sovietico naturalizzato russo.
16. Arthur Leonard Schawlow (Mount Vernon, 1921 – Palo Alto, 1999) fisico statunitense, vincitore, insieme al fisico olandese Nicolaas Bloembergen (Dordrecht, 1920), del premio Nobel per la fisica nel 1981, per '*il loro contributo allo sviluppo della spettroscopia laser*'.
17. Theodore Harold Maiman (Los Angeles, 1927 – Vancouver, 2007) fisico e ingegnere elettronico statunitense.
18. In particolare: nella medicina già nel 1962 trovò la sua prima applicazione per le micro-saldature della retina.
19. Ali Javan (Teheran, 1926 - Los Angeles, 2016) fisico e inventore iraniano, i suoi principali contributi alla scienza sono stati nei campi della fisica quantistica e spettroscopia. Ha co-inventato il laser a gas nel 1960, con William R. Bennett.
20. William Ralph Bennett Jr. (1930 - 2008) fisico americano.
21. Donald R. Herriott (1928 - 2007).
22. Situati a Murray Hill, nello stato del New Jersey, USA.

23. Izuo Hayashi (Tokyo, 1922 – 2005).
24. Morton B. Panish (Brooklyn, 1929).
25. I laser a scansione possono essere anche classificati in base al materiale impiegato per produrre l'emissione luminosa, ovvero secondo gli elementi per la generazione del raggio: utilizzando miscele di gas con emissioni sia continue che ad intermittenza; a stato solido, con brevi impulsi molto intensi; a semiconduttori, attraversati da corrente elettrica, etc.
26. Tale *range* dà il nome a questa classe di strumenti, chiamati appunto *range device* (Cfr. G. Guidi, *Terrestrial optical active sensors – theory and applications*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), '3D Recording and Modelling...', op. cit., p. 39).
27. Cfr. J. Li, Y. Guo, J. Zhu, X. Lin, Y. Xin, K. Duan, Q. Tang, *Large depth-of-view portable three dimensional laser scanner and its segmental calibration for robot vision*, in 'Optics and Laser in Engineering', vol. 45, pp. 1077-1087.
28. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 173.
29. Cfr. J.A. Beraldin, F. Blais, P. Boulanger, L. Cournoyer, J. Domey, S. El-Hakim, G. Godin, M. Rioux, J. Taylor, *Real world modeling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures*, in 'ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing', 55(4), 2000, pp. 230-250.
30. Ciò che viene proiettato sull'oggetto è una sequenza luminosa di forme codificate, quali bande alternate bianco-nera o colorate, cerchi chiari o scuri, griglie rettangolari, pattern pseudo-casuali, etc.
31. Nel caso che l'immagine acquisita dalla camera digitale sia una sequenza di strisce verticali alternate bianche e nere (*pattern*): l'immagine vista dalla fotocamera sarà ancora una sequenza di strisce se la proiezione avviene su un piano, mentre, se l'andamento della zona su cui si proietta non è piana, queste tenderanno a distorcersi diversamente a seconda della forma della superficie sottostante. Calibrando opportunamente il sistema di misura, questo metodo consente di verificare con grande accuratezza l'andamento spaziale di una superficie (Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 174).
32. Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 472.
33. Questo consiste nello sfruttare le frange d'interferenza (le cosiddette frange di Moiré) che si generano quando due *pattern*, di passo o orientamento differente, si sovrappongono.

34. Caratteristica comunque variabile a seconda del numero *pattern* proiettati.
35. Cfr. G. Guidi, *Terrestrial optical active sensors – theory and applications*, op. cit., p. 40.
36. Ciò nonostante, nel campo dei Beni Culturali, è stato svolto un eccezionale uso di scanner a triangolazione anche per applicazioni a monumenti di grandi dimensioni (Cfr. F. Bernardini, H. Rushmeier, I.M. Martin, J. Mittleman, G. Taubin, *Building a digital model od Michelangelo's Florentine Pieta*, in 'IEEE Computer Graphics Application', vol. 22, 2002, p. 59-67; M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, D. Fulk, *The digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*, in 'SIGGRAPH00', 2000, pp. 131-144).
37. Cfr. F.I. Apollonio, F. Remondino, *Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner*, op. cit., pp. 96-97.
38. Frequentemente tale definizione è stata attribuita, in maniera impropria, ad una particolare categoria di scanner laser, quelli montati su aeromobile, la cui definizione più corretta è invece *Airborne Laser Scanner* (ASL) (Cfr. J. Shan, C.K. Toth, *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, ed. CRC Press, 2008, p. 590).
39. Ogni punto viene rilevato mediante la misura diretta di due angoli e una distanza che vengono quindi convertiti in coordinate cartesiane all'interno di un sistema di riferimento cartesiano tridimensionale solidale allo strumento di acquisizione (Cfr. F. Rinaudo, *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, op. cit., p. 17).
40. Le stazioni totali sono composte da un teodolite, cioè un apparecchio di mira ottico per trapiantare un punto specifico nello spazio, a cui si aggiunge un goniometro, integrato con un distanziometro, per misurare con precisione l'orientamento orizzontale e verticale.
41. Di norma resta esclusa solo la porzione di piano relativa al treppiede su cui poggia il medesimo strumento. Comunque la maggiore o minore ampiezza degli angoli di esercizio dipendono dalle case costruttrici.
42. Di fronte ai simili strumenti di stima angolare implementati in questo tipo di scanner laser, per ridurre tale incertezza sono state proposte strategie differenti, tutte derivate da approcci originariamente sviluppati per sistemi radar. Una fusione interessante di sensori è stata fornita dalle camere *Range-Imaging* (RIM) che integrano misure di distanza (sulla base del principio TOF) e gli aspetti di *imaging*.

43. Del resto il sistema di controllo dei movimenti angolari del raggio laser condiziona sia la precisione di posizionamento dei singoli punti acquisiti, sia la velocità di scansione, sia la possibilità di inquadrare, con un'unica scansione, aree più o meno ampie.

44. Fino a 20-30 volte peggiore rispetto all'incertezza di uno scanner a triangolazione.

45. Le innumerevoli esperienze applicative, testimoniate adeguatamente dalla letteratura scientifica, soprattutto nell'ambito del patrimonio culturale, descrivono i campi di utilizzo più appropriati. Comunque, per una corretta tassonomia delle tecniche di misura, si rimanda ad ulteriori pubblicazioni specifiche (vedere D. Nitzan, A.E. Brian, R.O. Duda, *The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis*, in 'IEEE', vol. 65, n. 2, 1977, pp. 206-220; D. Nitzan, *Three-dimensional vision structure for robot applications*, in 'IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)', vol. 10, n. 3, 1988, pp. 291-309; B. Jähne, H. Haußbecker, P. Geißler, *Handbook of Computer Vision and Applications*, Academic Press, San Diego, USA, 1999).

46. Quale frazione decimale del secondo, un picosecondo (ps) è un'unità di tempo pari ad un millesimo di milionesimo di secondo, ovvero ad un millesimo di nanosecondo. Dato che un picosecondo viene definito come il tempo impiegato dalla luce per percorrere 0,299792458 millimetri nel vuoto, 3,3 ps è il tempo in cui questa percorre, approssimativamente, un mm.

47. RIEGL VZ-400, come dalla relativa scheda dati l'acquisizione senza contatto dei dati avviene utilizzando un fascio laser ad infrarossi stretto ed un meccanismo di scansione rapida (Cfr. RIEGL VZ-400, *3D Terrestrial Laser Scanner with Online Waveform Processing*, <http://www.riegl.com>).

48. In questo caso la precisione migliora fino a scendere sotto il millimetro e la velocità di acquisizione può salire fino a un milione di punti al secondo.

49. Cfr. V. Petrov, A. Kazarinov, A. Cherniavsky, I. Vorobey, S. Krikalev, P. Miktyukov, *Checking of large deployable reflector geometry*, in 'Processing EuCap 2006 – European Space Agency Special Publication', vol. ESA SP-626, 2006.

50. Cfr. J.A. Beraldin, F. Blais, S. El-Hakim, L. Cournoyer, M. Picard, *Traceable 3D Imaging Metrology: Evaluation of 3D Digitizing Techniques in a Dedicated Metrology Laboratory*, in '8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques Proceedings', Zurich, 2007;

51. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche*

e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico, op. cit., p. 177.

52. Cfr. G. Amoroso, F.I. Apollonio, F. Remondino, *Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (ToF) e a triangolazione. Utilizzo di laser scanner su superfici marmoree di epoca romana*, in B. Benedetti, M. Gaiani, F. Remondino (a cura di), 'Modelli digitali 3D in archeologia...', op. cit., p. 120.

53. Univocamente definiti dal Vocabolario Internazionale di Metrologia (VIM), pubblicato dal *Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM)* di ISO [Cfr. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 'International Vocabulary of Metrology, Basic and General Concepts and Associated Terms' (VIM), III ed., Pavillon de Breteuil, Francia, 2008, (JCGM 200:2008)].

54. A tale proposito Gabriele Guidi evidenzia che, nonostante la trasposizione di tali concetti al mondo di *imaging* 3D sia stata segnalata, per talune fotocamere che proiettano *pattern*, dalla 'Associazione degli Ingegneri tedeschi' nella guida di riferimento 'VDI/VDE 2634', uno *standard* internazionale più generale sulla misurazione ottica 3D è ancora in fase di preparazione da parte della Commissione E57 dell'*American Society for Testing Material* (ASTM). Peraltro, anche l'*International Standard Organization* (ISO) non ha ancora definito uno *standard* metrologico per gli strumenti di misura 3D senza contatto. Nelle ISO-10360 sono stati definiti solo i metodi per le macchine di misura a coordinate (CMM), mentre un'estensione per il loro abbinamento con macchine di misura ottica (ISO 10360-7:2011) è ancora in fase di sviluppo (Cfr. G. Guidi, *Terrestrial optical active sensors – theory and applications*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), '3D Recording and Modelling...', op. cit., pp. 43-44).

55. La risoluzione può dipendere, per esempio, dal rumore (interno ed esterno) o dalla frizione, Essa può dipendere anche dal valore della grandezza misurata [Cfr. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 'International Vocabulary of Metrology...', op. cit., p. 42].

56. La possibilità di incrementare di piccole quantità (in genere indicate con 'δ') l'angolo di rilevazione consente di contenere la distanza tra i punti che costituiscono la nuvola, così come la minor dimensione dello *spot* laser permette di determinare con miglior accuratezza il suo centro.

57. Cfr. D. MacKinnon, J.A. Beraldin, L. Cournoyer, F. Blais, *Evaluating laser range scanner lateral resolution in 3D metrology*, in 'Proceedings SPIE 7239, Three-Dimensional Imaging Metrology', vol. 7239, San Jose, CA, 2009, pp. 1077-1087.

58. Il cui nome si deve agli statunitensi Harry T. Nyquist (Nilsby, 1889 – Harlingen, 1976) e Claude E. Shannon (Petoskey, 1916 – Medford, 2001). Il teorema, comparso per la prima volta nel 1949, definisce la minima frequenza – detta appunto frequenza di Nyquist o anche 'cadenza di Nyquist' – utile per campionare un segnale analogico senza perdere informazioni, e per poter quindi ricostruire il segnale analogico tempo continuo originario. Del resto il campionamento è il primo passo del processo di conversione analogico-digitale di un segnale; esso consiste nel prelievo di campioni (*samples*) da un segnale analogico e continuo nel tempo, ogni Δt secondi. Quindi Δt ed f_s (pari a $1/\Delta t$) sono rispettivamente l'intervallo e la frequenza di campionamento. Il risultato è un segnale analogico in tempo discreto che può essere successivamente quantizzato, codificato e reso accessibile a qualsiasi elaboratore digitale.

59. È un modo di dire (dall'inglese *rule of thumb*) spesso usato, non solo in ambito matematico ed informatico, per indicare una linea guida o un principio spesso empirico, quindi dedotto dall'esperienza, risultato valido nella maggior parte dei casi.

60. Dato che il misurando indica la 'grandezza sottoposta a misurazione', l'accuratezza di misura non è una grandezza, ad essa pertanto non si assegna un valore numerico. Questa comunque, erroneamente usate per indicare giustezza/esattezza di misura, è interpretata talvolta come concordanza fra i valori misurati attribuiti a un misurando. [Cfr. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 'International Vocabulary of Metrology...', op. cit., p. 21].

61. Ciò che viene indicato nella prima nota alla definizione 2.13 si riferisce senza dubbio a quanto ammesso per l'errore di misura. Questo infatti, quale 'valore misurato di una grandezza meno un valore di riferimento di una grandezza' può essere noto, ma non quando il valore di riferimento è un valore vero (Cfr. Ibidem, p. 22).

62. Nelle tre note a corredo della definizione viene spiegato come anche alla giustezza/esattezza (*trueness*) di misura, non essendo questa una grandezza, non sia possibile assegnare un valore numerico; tuttavia, la ISO 5725 definisce indicazioni per la valutazione del grado di concordanza citato nella presente definizione. Da non confondere con l'accuratezza di misura, l'esattezza varia in modo inverso rispetto all'errore sistematico, ma non ha relazioni con l'errore casuale (Cfr. Ibidem, p. 21).

63. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 178.

64. Generalmente la precisione di misura è espressa numericamente mediante misure d'imprecisione, quali scarto tipo, varianza, o coefficiente di variazione sotto condizioni di misurazione specificate. Le condizioni specificate, citate nella presente definizione, possono essere, per esempio, condizioni di ripetibilità, condizioni di ripetibilità intermedia, oppure condizioni di riproducibilità, concetti definiti nella ISO 5725-3:1994). Il concetto di precisione di misura è richiamato nelle definizioni di ripetibilità di misura, di ripetibilità intermedia di misura e di riproducibilità di misura (Cfr. Ibidem, p. 22).

65. È quindi un parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori che sono attribuiti a un misurando, sulla base delle informazioni utilizzate. L'incertezza di misura include componenti che hanno origine da effetti di natura sistematica, come le componenti associate alle correzioni ed i valori assegnati ai campioni di misura, e comprende anche l'incertezza di definizione. Talvolta effetti sistematici stimati non vengono corretti, ma si preferisce aggiungere ulteriori componenti dell'incertezza di misura che ne tengano conto (Cfr. Ibidem, p. 25).

66. Nel caso di scanner a triangolazione, ad esempio, quando lo *spot* laser è acquisito da un sensore CCD, esso corrisponde all'effetto ottico che si verifica sul piano di messa a fuoco attraverso una macchia luminosa (lo *spot* laser) con una serie di puntini scuri al suo interno, la cui distribuzione è direttamente legata alla struttura del materiale (Cfr. G. Amoroso, F.I. Apollonio, F. Remondino, *Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (ToF) e a triangolazione...*, op. cit., p. 121; R. Baribeau, M. Rioux, *Influence of speckle on laser range finders*, in R. Driggers (a cura di), 'Applied optics', vol. 30, n. 20, OSA, USA, 1991, pp. 2873-2878).

67. È possibile distinguere fra fonti di errore ottiche e non-ottiche. Fra le prime: (i) speckle, segnale perso in rumore; (ii) dimensione dello spot size vs. la profondità di campo; (iii) spostamento della misura e rumore (penetrazione della superficie); (iv) artefatti di misura (salti di spigoli e riflettanza). Fra le seconde, invece: (i) vibrazioni; (ii) turbolenze d'aria; (iii) errori meccanici; (iv) errori umani (Cfr. G. Amoroso, F.I. Apollonio, F. Remondino, *Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (ToF) e a triangolazione...*, op. cit., p. 124)

68. Dal momento che la forma di test utilizzata è conosciuta a priori, 'questa si traduce nel calcolare l'istogramma degli errori il cui profilo, se i fenomeni che la concorrono nell'alterazione aleatoria delle misure sono quelli attesi, corrisponde ad una campana di Gauss (o *gaussiana*)' (Cfr. Ivi).

69. Cfr. G. Guidi, *Terrestrial optical active sensors...*, op. cit., p. 44.
70. Cfr. G. Guidi, M. Russo, G. Magrassi, M. Bordegoni, *Performance Evaluation of Triangulation Based Range Sensors*, in 'Sensors', 2010, vol. 10, pp. 7192-7215.
71. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 177.
72. Cfr. F. Rinaudo, *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, op. cit., p. 24.
73. Fattori, quali la velocità di acquisizione, la risoluzione di scansione e divergenza del raggio, la portata effettiva, il campo di misura, la registrazione delle scansioni, l'acquisizione RGB, la trasportabilità e l'autonomia (Cfr. *Ibidem*, p. 27).
74. Prese molto defilate consentono di acquisire superfici più estese, ma con dati di qualità inferiore, ovvero minore energia del segnale riflesso da superfici scorciate, dimensione dello *spot* maggiore per le zone più sitanti, risoluzione della *range map* non uniforme (Cfr. V. Bonora, G. Tucci, *Il laser scanner terrestre e il rilievo dei Beni Culturali*, in F. Sacerdote, G. Tucci (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', ed. Alinea, Firenze, 2007, p. 93).
75. In tal caso una soluzione possibile, ma logisticamente parlando costosa, consiste nel predisporre un *set* schermato (ad esempio con tende) per limitare la luce ambientale esterna nell'area da rilevare. In queste circostanze, tuttavia, un approccio più pratico per ottenere un'altrettanta alta risoluzione è ricorrere all'impiego di tecniche ottiche passive, come il già citato *image matching*, che funzionano bene con una forte illuminazione ambientale.
76. Durante la fase di progettazione delle prese con lo scanner laser, si deve già prevedere, ad esempio, l'eventuale acquisizione dell'immagini fotografiche necessarie per la mappatura del modello, così come la corretta disposizione dei *target* che consentiranno l'unione delle singole nuvole di punti in un unico sistema di riferimento.
77. La qualità della nuvola di punti rilevata dallo scanner laser è funzione dell'angolo con cui il raggio laser colpisce la superficie dell'oggetto da rilevare. Se l'angolo è troppo elevato può accadere che la relazione riflessa risulti troppo bassa e, di conseguenza, il segnale rilevato non venga rilevato (effetto rumore). Si può altrettanto considerare come la risoluzione di scansione, teoricamente, sia pari all'ampiezza dell'angolo di rotazione del raggio laser tra due punti adiacenti. Quindi, se la divergenza del raggio

- ad una determinata distanza è tale da superare questo intervallo, l'effettiva risoluzione di scansione decresce.
78. Se si tratta di un'acquisizione con uno scanner 3D a triangolazione, a causa del ridotto campo di vista dello strumento, si tende a prevedere una sovrapposizione fra *range map* contigue dell'ordine del 30-40%. Nel caso di una registrazione da effettuarsi mediante uno strumento TOF, seppure sono necessarie molte meno scansioni e una percentuale di sovrapposizioni inferiore, è comunque utile assicurarsi una buona copertura anche attraverso l'utilizzo di *target* esterni nell'ambiente attraverso i quali orientare poi le singole prese.
79. Ciascuna scansione rappresenta una porzione dell'oggetto o della scena rilevata, o ancora meglio, una campionatura della superficie visibile da uno specifico punto di vista. Al fine di una ricostruzione tridimensionale completa, l'oggetto deve essere scandito da più punti, limitando le eventuali zone d'ombra. Comunque la massima capacità di catturare i dettagli di una superficie da parte delle qualità strumentali definisce il passo minimo di campionamento utilizzabile, quindi la relativa risoluzione.
80. Considerando un sistema con un campo visivo sferico, il passo di campionamento impostato è 'teorico' poiché risulta costante solamente sulla sfera di raggio prefissato che ha come centro lo scanner, mentre in realtà la matrice di acquisizione reale varia a seconda della distanza a cui si trova la superficie da scandire.
81. Il prodotto di ciascuna ripresa, per sistemi a triangolazione, viene detto *range map* e consiste in una nuvola di punti 2.5D, mentre per sistemi TOF si preferisce chiamarlo semplicemente nuvola di punti, ossia un insieme di punti 3D.
82. Per sistemi a scansione mobili è utile adottare in fase di progetto, come parametro medio di ricoprimento (sovrapposizione) tra le strisciate adiacenti, valori percentuali prudenziali fra il 15 ed 25%, considerando inoltre la determinazione della posizione relativa fra le varie componenti del sistema (GPS, IMU, distanziometro) che, per via delle sollecitazioni meccaniche cui tali apparecchi sono sottoposti durante il loro movimento, possono variare in modo imprevedibile e compromettere in modo sistematico non trascurabile la precisione del rilievo. Ovviamente se verificano notevoli escursioni lungo la direzione perpendicolare al piano del movimento del sensore, come nel caso nel rilievo di zone montane, la percentuale di sovrapposizione fra le varie strisciate deve essere maggiore, fino al 40%. (Cfr. F. Rinaudo, *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, op. cit., p. 25).
83. Le doppie coordinate dei punti omologhi potrebbero essere utilizzate per roto-traslare una scansione nel sistema di rife-

- rimiento della prima, oppure, ruotare entrambe in un sistema di riferimento esterno eventualmente noto.
84. Poiché è possibile svolgere l'operazione di rimozione dell'inutile eccedenza di punti prima o dopo l'allineamento delle singole scansioni.
85. Ciò si riferisce a quanto viene acquisito dal sensore in caso di elevate variazioni cromatiche, discontinuità superficiali, natura traslucida del materiale, etc., ma che non trova comunque riscontro con la geometria reale della superficie.
86. I punti acquisiti da scansioni 3D sono affetti da un disturbo, noto come 'rumore', variabile in funzione del sistema di misura usato dallo scanner laser e dalle caratteristiche superficiali dell'oggetto rilevato (Cfr. V. Bonora, G. Tucci, *Il laser scanner terrestre e il rilievo dei Beni Culturali*, in F. Sacerdote, G. Tucci (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura...', op. cit., p. 111).
87. Cfr. F.I. Apollonio, F. Remondino, *Modellazione 3D da sensori attivi...*, op. cit., p. 100.
88. Cfr. Ivi.
89. Cfr. *Ibidem*, 101.
90. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 179.
91. A tale proposito è preferibile, al fine della compensazione degli errori, che i *target* risultino battuti da una poligonale topografica di appoggio chiusa.
92. L'algoritmo implementato nei vari prodotti commerciali costituisce comunemente una qualche variante dell'ICP, essendo questa la procedura matematica di registrazione maggiormente applicata nel campo della modellazione 3D sino dal suo esordio nel 1992 (Cfr. A. Gualtieri, A. Vettore, *Tecniche di registrazione*, in F. Sacerdote, G. Tucci (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura...', op. cit., p. 41, 44-47).
93. Cfr. *Ibidem*, 101.
94. Nel caso in cui siano stati compiuti errori di selezione, ad esempio, da parte dell'operatore, o la superficie risulti particolarmente ricca di caratterizzazioni, gli errori di allineamento potrebbero rimanere o, comunque, non essere completamente eliminati. Per tale ragione sono stati proposti altri algoritmi, quali l'*Iterative Dual Correspondence* (IDC) o il *Scan Matching Metric-Based* (MblCP), per compensare le lacune mostrate dall'ICP (Cfr. F. Lu, E. Milios, *Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans*, in 'Journal of Intelligent and Robotic Systems', ed. Springer, vol. 18(3), 1997, pp.

- 249-275; J. Mingues, F. Lamiroux, L. Montesano, *Metric-Based Scan Matching Algorithms for Mobile Robot Displacement Estimation*, in 'Robotics and Automation', ICRA/IEEE, 2005, pp. 3557-3563).
95. Cfr. J. Salvi, C. Matabosch, D. Fofi, J. Forest, *A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation*, in 'Image and Vision Computing', vol. 25, n. 5, 2007, pp. 587-596. Comunque, al fine di aggiornare lo stato dell'arte sugli algoritmi di allineamento, vedere C. Deng, *Registration between Multiple Laser Scanner Data Sets*, in 'Laser Scanning, Theory and Applications', Chau-Chang Wang (ed.).
96. Ovvero da un sistema satellitare globale di navigazione (dall'acronimo inglese di *Global Navigation Satellite System*), in riferimento ovviamente ai sistemi di geo-radiolocalizzazione e navigazione terrestre, marittima o aerea, tramite reti satellitari.
97. Cfr. F. Remondino, *From point cloud to surface: the modeling and visualization problem*, in 'The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences', vol. 34, n. 5/W10, Switzerland, 2003.
98. Cfr. G. Turk, M. Levoy, *Zippered polygon meshes from range images*, in 'Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics', 1994, pp. 311-318.
99. M. Soucy, D. Laurendeau, *A general surface approach to the integration of a set of range views*, in 'IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI', vol. 17, n. 4, 1995, pp. 344-358.
100. F. Bernardini, J. Mittleman, H. Rushmeier, C. Silva, G. Taubin, *The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction*, in 'IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics', vol. 5, 1999, pp. 349-359.
101. B. Curless, M. Levoy, *A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images*, in 'SIGGRAPH96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques', 1996 pp. 303-312.
102. B. Delaunay, *Sur la sphère vide*, *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdel'ne Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk*, 1934, pp. 793-800.
103. Anche se non è l'unico modo per realizzare una triangolazione, il principio di *Delaunay* è quello che viene sfruttato maggiormente dai *software* in commercio, poiché permette di generare *mesh* regolati con variazioni contenute di dimensione fra i vari triangoli. Nello specifico il principio di *Delaunay* stabilisce che per ogni punto è possibile definire un poligono che lo contiene costruito dalle linee che bisezionano i segmenti congiungenti

il punto con i punti che lo circondano. In definitiva, un poligono di Delaunay nel piano è composto da triangoli non sovrapposti, i cui cerchi circoscritti a ciascuno non devono contenere nessun altro nodo del reticolo.

104. Come già spiegato in precedenza (vedi par. 4.2) il termine 2.5D indica che ad ogni coppia di coordinate (x,y) poste sul piano del sensore, corrisponde un solo valore di (z) .

105. Spesso infatti le superfici *mesh* possono apparire ruvide e fortemente disturbate; si rende, quindi, necessario l'intervento con specifici filtri per ridurre il rumore. Per tale scopo, specie in rilievi documentativi quale quello archeologico, si preferiscono algoritmi di *smoothing* che limitino la perdita di dettaglio, calcolando per ciascun vertice la posizione media con il vertice più vicino, come ad esempio il *Laplacian smooth*.

106. Un triangolo di una *mesh* viene definito tale se la stessa 'maglia' non contiene bordi o vertici *non-manifold*, né auto intersezioni. Un bordo *non-manifold* possiede più di due triangoli incidenti e un vertice *non-manifold* è generato unendo due fogli superficiali insieme in quel determinato vertice, cosicché quel vertice sia incidente a due ventagli di triangoli (Cfr. F.I. Apollonio, F. Remondino, *Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner*, op. cit., p. 105).

107. Il *rendering* è un processo che restituisce un'immagine *bitmap* di una scena di cui siano stati definiti geometria, materiali, punti di vista e illuminazione. Con il termine *rendering* si indica sia il processo di calcolo che il risultato.

108. Perché il modello *mesh* sia pronto per la stampa 3D, questo deve essere – usando l'appropriato termine tecnico inglese – *watertight*.

109. Introdotta per risolvere i problemi di interpolazione multidimensionali, queste *Radial Basis Functions* (RBF) ricostruiscono molteplici superfici lisce a partire da nuvole di punti, riparandone le maglie incomplete. Oggi sono disponibili approcci veloci di applicazione delle RBF, i quali consentono di modellare grandi insiemi di dati, composti da milioni di punti di superficie. La definizione di un valido algoritmo nel processo di adattamento ha ridotto il numero di RBF richieste per rappresentare una superficie, traducendosi in una compressione significativa con vantaggi ulteriori computazionali. Ciò comporta un interpolatore 'più liscio' nella ricostruzione *mesh*. Tale caratteristica, indipendente dalla scala, si è dimostrata particolarmente adatta alla ricostruzione di superfici da dati non uniformemente campionati (vengono riempiti i fori ed estrapolate le superfici senza problemi). La rappresentazione RBF, essendo in effetti un

modello solido – ciò significa che gradienti e normali alla superficie possono essere determinati analiticamente – aiuta a generare *mesh* uniformi e, pertanto si dimostra vantaggiosa per le applicazioni di semplificazione della *mesh* e di *remeshing*. (Cfr. J.C. Carr, R.K. Beatson, J.B. Cherrie, T.J. Mitchell, W.R. Fright, B.C. McCallum, T.R. Evans, *Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions*, in 'Computer Graphics', SIGGRAPH01 Proceedings, 2001, pp. 67-76).

110. Y. Ohtake, A. Belyaev, M. Alexa, G. Turk, H.P. Seidel, *Multi-level partition of Unity Implicit*, in 'ACM Transactions on Graphics', vol. 22, n. 3, 2003, pp. 463-470.

111. Per ottenere modelli 3D *watertight* tale soluzione è finalizzata, in particolare, alla correzione di superfici che presentano fori per la cui chiusura risulta troppo complesso, sia dal punto di vista geometrico che topologico, utilizzare semplici algoritmi di triangolazione. In definitiva viene applicato un processo di diffusione volumetrica per estendere la funzione di distanza con cui definire la superficie, che inizialmente è calcolata solo in prossimità delle superfici osservate. L'algoritmo proposto, semplice da implementare, si dimostra efficace per l'esecuzione su grandi *data set*, poiché il calcolo è limitato alle aree nei dintorni dei fori (Cfr. J. Davis, S.R. Marschner, M. Garr, M. Levoy, *Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion*, in 'Proceedings 3D Processing Visualization and Transmission', 2002, pp. 428-438; R. Sagawa, K. Ikeuchi, *Hole filling of a 3D model by flipping signs of a signed distance field in adaptive resolution*, in 'IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI', vol. 30, n. 4, 2008, pp. 686-699).

112. Utile soprattutto nelle applicazioni di gioco ed intrattenimento.

113. Oggi sono disponibili vari algoritmi di semplificazione *mesh* che sono stati ampiamente esaminati e confrontati (Cfr. P. Cignoni, G. Medioni, *Object modeling by registration of multiple range images*, in 'Image and Vision Computing', vol. 10-3, 1998, pp. 145-155; Cfr. F.I. Apollonio, F. Remondino, *Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner*, op. cit., pp. 108-111).

114. Cfr. F.I. Apollonio, F. Remondino, *Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner*, op. cit., pp. 113-114).

115. In tal caso le criticità dei sensori ottici sono quelle intrinseche alla fotografia, legate principalmente all'illuminazione dell'oggetto ed alle differenti caratteristiche di esposizione di ogni immagine catturata (Cfr. G. Tucci, D. Cini, V. Bonora, A. Nobile, *Proposta per la digitalizzazione 3D dei reperti arche-*

ologici, in A.M. Jasink, G. Tucci, L. Bombardieri (a cura di), 'MUSINT Le Collezioni archeologiche egee e cipriote in Toscana Ricerche ed esperienze di museologia interattiva', ed. Firenze University Press, 2011, p. 73).

116. Cfr. Ivi.

117. Cfr. M. Russo, F. Remondino, G. Guidi, *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, op. cit., p. 180.

118. Software sviluppato da un gruppo di ricerca del 'Visual Computing Lab CNR-ISTI' (Pisa) che si avvale della collaborazione di sviluppatori sparsi in tutto il mondo (<http://meshlab.sourceforge.net/>).

119. A tale proposito, nel caso in cui non si abbiano informazioni di colore, si può migliorare l'aspetto dei modelli *mesh* con tecniche di ombreggiatura (*shading*) che simulano l'attenuazione dell'illuminazione in corrispondenza di spazi occlusi (ad esempio quella di *Ambient Occlusion* in *MeshLab*).

120. Attraverso la proiezione di immagini sulla superficie che consentono di andare oltre il visibile (termografie, immagini in luce UV, etc.), o come quella di foto d'archivio e di elaborati tematici (lettura degli elevati, mappatura dei fenomeni di dissesto e degrado, etc.). Comunque, sempre nello spirito di ricostruire un modello foto-realistico, in alcuni casi basta incrementare la somiglianza con l'oggetto fisico, senza complicare ulteriormente il modello geometrico tramite l'aggiunta di un numero elevato di poligoni, ma soltanto 'simulando' le finiture superficiali, gli elementi debolmente aggettanti, o incavati, etc. (Cfr. A. De Sanctis, *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, op. cit., p. 480).



5. Insediamento etrusco a Poggio Colla

L'insediamento etrusco di Poggio Colla si trova a circa 35 chilometri a nord-est di Firenze, nel comune di Vicchio del Mugello. Tale territorio si imposta su un bacino lacustre situato nella zona di confine fra Toscana e Romagna, il cui aspetto viene prevalentemente caratterizzato dalle principali dorsali dell'Appennino settentrionale¹. Queste sono costituite dalla catena che dalla Futa corre – in direzione nord-ovest/sud-est – verso il Monte Falterona fino a raccordarsi con la parte settentrionale del massiccio del Pratomagno, e ad altri rilievi minori e crinali² che, in particolare a sud, separano il Mugello dalla valle dell'Arno e da Firenze mediante Monte Giovi, Monte Senario, Monte Morello e la catena della Calvana. Nonostante il suo carattere prevalentemente montano-collinare, questo territorio mostra al suo interno paesaggi diversificati, strutturandosi nel quadrante sud-ovest quale ampio bacino con una stretta striscia pianeggiante lungo il corso medio-superiore del fiume Sieve.

Tale varietà geomorfologica ha influenzato la localizzazione e la tipologia insediativa che hanno caratterizzato l'organizzazione antropica ivi sviluppata fin dall'antichità. Infatti, sebbene ancor oggi il fondovalle della Sieve costituisca la direttrice principale di sviluppo dell'area – oramai ampiamente urbanizzata e collegata alla rete nazionale tramite un rilevante tracciato infrastrutturale –, numerosi ritrovamenti testimoniano l'occupazione del territorio fin dall'epoca paleolitica³.

Degli Etruschi, popolazione insediata nelle odierne regioni della Toscana, Lazio settentrionale e Umbria, con alcune propaggini anche in Campania e nella Pianura Padana, rimangono numerose tracce in tutta la zona del Mugello, seppure le conoscenze archeologiche disponibili siano ancora limitate⁴. È comunque possibile intuire l'importante ruolo che la civiltà Etrusca ha svolto in questo strategico territorio nel complesso scenario dei traffici e collegamenti commerciali che si andarono

sviluppando fra le città dell'area tosco-laziale ed i maggiori centri padani. Furono gli Etruschi, infatti, a tracciare un primo schema della rete viaria nell'area mugellana: una serie di percorsi che univano in origine Fiesole a Felsina – l'attuale Bologna – e che poi, ampliati e migliorati dai Romani, hanno avuto grande rilevanza nella storia del territorio⁵. A tale proposito la conoscenza di un insediamento etrusco che dal VIII fino al II secolo a.C. si è sviluppato sull'altopiano di Poggio Colla fornisce un contributo fondamentale per lo studio della civiltà Etrusca in questo territorio e non solo.

5.1 Cronologia e orientamento del Santuario

Il santuario di Poggio Colla sorgeva in posizione dominante nel cuore del Mugello, beneficiando di una chiara visuale fino alle montagne dell'Appennino dove, già nel periodo etrusco, diversi passi conducevano alle pianure dell'Italia settentrionale e verso l'Adriatico.

Gli scavi condotti per ventuno anni da un consorzio di università americane ed europee⁶ – attraverso un progetto che ha cercato di coniugare lo scavo con il rilievo e la prospezione geo-archeologica – hanno interessato un pianoro⁷ adibito a luogo sacro in un periodo di cinque secoli, compreso tra il VII secolo a.C. e la distruzione del sito stesso avvenuta nel II secolo a.C.

Tuttavia tracce della presenza dell'uomo sono state individuate anche relativamente al periodo Neolitico (V millennio a.C.) e alla Media Età del Bronzo (1700-1350 a.C.), lasciando supporre che il luogo fosse un centro di culto già in epoche precedenti a quella etrusca⁸.

Nel corso degli scavi il santuario rurale si è dunque rivelato un insediamento singolare per la sua lunga durata nel tempo, poiché attraversando la maggior parte della

Fig. XV – Nelle pagine precedenti, foto della mostra 'Scrittura e culto a Poggio Colla: un santuario etrusco nel Mugello' che ha avuto luogo dal 2 settembre al 31 dicembre 2016 in Palazzo Panciatichi-Covoni a Firenze, nell'ambito delle Celebrazioni Etrusche promosse dal Consiglio Regionale della Toscana, Soprintendenza ABAP per la Città Metropolitana di Firenze e le Province di Prato e Pistoia e l'MVAP.



storia etrusca, costitui probabilmente il centro dominante rituale e politico della regione intermontana che conduce agli Appennini.

I rilievi del colle e delle zone limitrofe hanno dimostrato che il modello d'insediamento si espandeva ben oltre la parte sommitale, ovvero la cosiddetta 'acropoli'. Infatti l'occupazione etrusca può essere documentata sul vicino promontorio di Montesassi, sul limitrofo altopiano e, per alcuni chilometri, sui pendii e terrazzamenti circostanti. Proprio perché in tali luoghi i lavori agricoli minacciavano gli importanti contesti culturali, si è scelto di tentarne il salvataggio tramite il lavoro archeologico almeno in due aree controllate: il Podere Funghi, un campo di circa 900 metri a nord-est di Poggio Colla, ed il versante nord-ovest che conduce alla cima dell'acro-

Fig. 34 – (a sinistra) Planimetria di riferimento della regione Toscana con l'indicazione del bacino del Mugello. Fig. 35 – (sotto) Vista satellitare in cui sono localizzati i principali siti archeologici nell'ampia area di confine tosco-romagnola e la cima del Monte Falterona (fonte: Google Earth Pro).

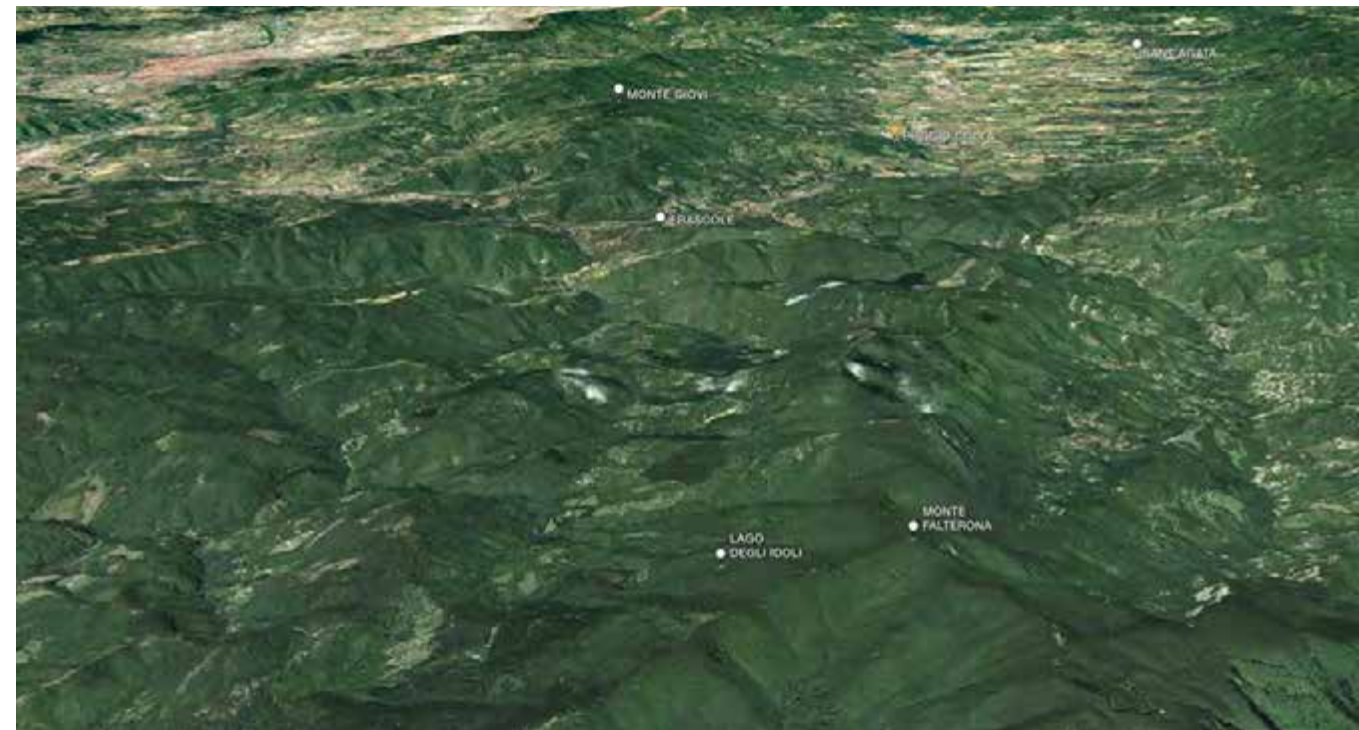
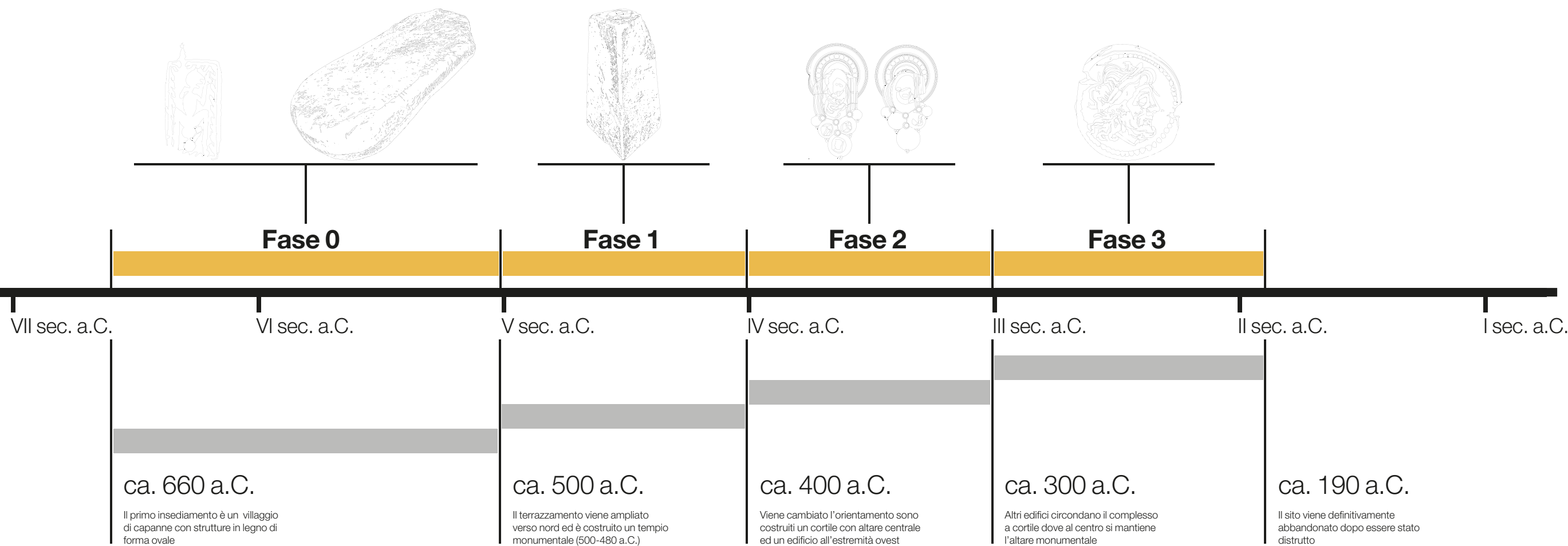


Fig. 36 – (in alto) Carta del contesto territoriale per il riferimento archeologico con l'indicazione dei principali insediamenti etruschi. Il sito di Poggio Colla è stato strategicamente collocato in una posizione dominante alla congiunzione di due aree distinte, l'ampia conca del Mugello e il passaggio stretto della Val di Sieve, ovvero ciò che è stato chiamato 'Agro Fiorentino'. L'angolo di allineamento apparentemente retto (indicato con il tratteggio di colore rosso) individuato congiungendo Poggio Colla agli altri due principali santuari etruschi della zona (Monte Falterona-Lago degli Idoli e Monte Giovi) non sembra essere un'irrelevante coincidenza.

poli. Quest'ultima, un rettangolo fortificato di un acro e mezzo, è situata in posizione dominante nella giuntura fra il bacino del Mugello e la valle del fiume Sieve. Da questa posizione vantaggiosa gli Etruschi controllavano una delle principali arterie che conduceva dalle pendici degli Appennini al bacino dell'Arno, al Casentino, fino ai principali siti etruschi come Arezzo.

Poggio Colla si trova ai margini della Toscana, un luogo quindi di confine tra due differenti zone situate al margine del dominio etrusco, che presenta, però, linee di sito chiare come altri santuari etruschi: *in primis* il Lago degli Idoli sul Monte Falterona ad est e quello sul Monte



Giovi, verso Fiesole, a sud. Del resto, anche il particolare allineamento di questi tre siti, pare rimandare a rapporti di disposizione per niente casuali.

A Poggio Colla i lavori di scavo archeologico si sono concentrati su tre aree: il Podere Funghi, una zona artigianale 750 metri a nord-est dell'acropoli; il versante nord-ovest, dove è stata scoperta una cava 'orientalizzante', e la stessa acropoli. Quest'ultima è stata certamente un santuario ed il suo scavo ha prodotto negli ultimi anni una notevole ricchezza d'informazioni sull'attività votiva e rituale, aprendo così ad ulteriori ricerche sulla sua storia più antica.

La prima ceramica, che si trova in due strati pesantemente carbonizzati sul bordo settentrionale della terrazza,

Fig. 37 – La Cronologia del santuario etrusco di Poggio Colla.

è bucchero ed impasto di bucchero, quindi databile in modo sicuro almeno fino dalla metà del VII secolo a.C. Il bucchero, ivi rinvenuto in grande quantità, è di altissima qualità ed in gran parte decorato, certamente paragonabile a quello trovato sui siti di Fiesole ed Artimino. L'insieme degli oggetti ritrovati comprende pezzi legati al cetto elevato della popolazione, come vasi, tazze con i manici alati fenestrati, recipienti per bere. Mentre solo pochi rinvenimenti possono fornire testimonianza dell'architettura risalente al contesto orientalizzante-arcaico, vi è l'evidenza di almeno di tre fasi successive di costruzione.

5.1.1 Sviluppo tra VII e II secolo a.C.

Nella sua lunga storia il santuario è stato oggetto di una serie di cambiamenti. Recenti scavi hanno rivelato l'esistenza, nella fase pre-monumentale (Fase 0), di un villaggio di capanne caratterizzato da strutture di forma ovale delimitate da buche di palo scavate nella roccia⁹. È quindi possibile ritenere che nel VII secolo a.C. a Poggio Colla vi fosse già un insediamento formato da piccoli edifici costruiti con pali di legno, che furono forse distrutti a causa di un incendio, avvenuto intorno alla metà del VI secolo, lasciando dietro di sé poche tracce, se non quelle delle loro fondamenta scavate nella roccia. Il pianoro sulla collina fu così modificato ed ampliato in direzione

nord, in modo tale da ospitare un tempio monumentale orientato proprio lungo l'asse nord-sud (Fase 1).

Fu quindi adottata un'architettura totalmente nuova, realizzata in pietra scolpita e terracotta, per erigere un monumento alle divinità di Poggio Colla su una *arx* – ovvero un altopiano – collocata in una splendida posizione visibile da tutta la vallata sottostante.

Le ceramiche ed un'antefissa¹⁰ a testa umana, rinvenute negli strati del terrazzamento per la costruzione del tempio, permettono di datare la struttura intorno al 500-480 a.C.¹¹. Questa prima architettura di Fase 1 è costituita da un tempio di pietra distrutto ma i cui elementi, tre basi di colonne e numerosi blocchi di podio stampati, sono stati dispersi sull'acropoli.



Sebbene la posizione di questa struttura non sia stata ancora del tutto definita, la linea di blocchi massicci in arenaria sotto l'angolo nord-est degli edifici di fasi successive, potrebbe costituirne un lato, in qual caso il tempio avrebbe avuto un orientamento nord-sud. I blocchi superstiti delle fondamenta sono di grandi dimensioni (alcuni raggiungono i due metri di lunghezza) e accuratamente lavorati. Al tempio appartengono sei basi di colonne e numerosi blocchi del podio con modanature semi-arrotondate. Tutti questi elementi furono forse rimossi dopo la prima distruzione avvenuta nel 400 a.C. circa; lo spostamento e la loro ricollocazione sembra

Fig. 38 – (nella pagina precedente) Foto dell'area, durante la campagna di scavo 2014, dove è ben visibile la struttura architettonica di Fase 2. Gran parte della base dell'altare, composto da blocchi di arenaria squadrati, è ancora in situ. Durante gli scavi il terreno intorno all'altare si è presentato scuro ed oleoso. Alcuni frammenti di terracotta dipinta, forse parte di un rivestimento dell'altare stesso, sono stati rinvenuti nelle vicinanze. A nord dell'altare è stato ritrovato un focolare circolare, mentre ad ovest di questi due elementi una lente di terreno conteneva un deposito votivo costituito da centinaia di frammenti di bronzo, che vanno da piccole palline ad oggetti frammentati, fino a grandi pezzi di bronzo fuso.

Fig. 39 – (sotto) Panorama dal colle di Vespignano verso Vicchio, a sinistra il promontorio di Poggio Colla.

no essere associati a riti eseguiti per superare l'evento traumatico di tale devastazione. Infatti viene attestata la pratica del riuso di molte parti del tempio in contesti successivi, suggerendo rituali di distruzione o di post-distruzione, poiché la natura sacra delle colonne e dei blocchi del podio continuava anche dopo che la loro funzione architettonica si era conclusa.

L'acropoli, dopo la distruzione del primo tempio, venne riorganizzata su vasta scala e si susseguirono almeno altre due fasi di vita del santuario. Fu innanzitutto costruito un ampio cortile (22 per 10,5 metri) alla cui estremità occidentale sorgeva un edificio con un grande altare (di circa 1,5 per 1,5 metri) disposto lungo l'asse centrale est-ovest (Fase 2). Questa variazione di orientamento rispetto a quello del periodo precedente è forse indice di discontinuità o di modifica del culto. Infatti, mentre la struttura di Fase 1 era orientata approssimativamente lungo l'asse nord-sud, il cortile di Fase 2 è allineato al naturale terrazzo rettangolare della *arx*¹².

In Etruria un analogo cambiamento della struttura del santuario e del suo orientamento viene riscontrato presso l'area sacra di *Satricum*¹³. Qui, infatti, un primo tempio monumentale di modeste dimensioni e con colonne sui tre lati – la cui costruzione risale al VI secolo a.C. – che era orientato lungo un asse pressoché in direzione est-ovest, fu ben presto sostituito da un secondo edificio data-to intorno al 480 a.C., maggiormente monumentale ma

Poggio Colla





Fig. 40 – (sopra) Planimetria dell'altipiano di Poggio Colla.
 Fig. 41 – (nella pagina seguente) Foto in situ del cosiddetto 'Deposito dell'Iscrizione' (CR4).

con colonne tutt'attorno ed orientamento leggermente spostato (di circa 30°) verso nord rispetto a quello precedente.¹⁴

In un momento successivo (Fase 3) lungo il perimetro del cortile, dove si mantenne il grande altare centrale, furono costruiti altri edifici. L'edificio di Fase 3 mostra ancora un grande cortile rettangolare, ma con le fondazioni di macerie di pietra piuttosto che di conci. Il cortile è simile a quello di Fase 2, ma se ne discosta leggermente con l'ampliamento di circa un metro a sud e ad est e con una chiara evidenza di camere su almeno tre lati. In seguito, il santuario sulla sommità della collina fu fortificato e rimase tale fino alla sua completa distruzione; venne abbandonato agli inizi del II secolo a.C., come testimoniato dal ritrovamento di un tesoretto di 100 monete romane in

argento. Tale testimonianza numismatica data la struttura di Fase 3 al III secolo e, sulla base di tali reperti, possiamo postulare che fu probabilmente distrutta per opera dei Romani intorno all'inizio del II secolo a.C.¹⁵, evento suggerito anche dai muri crollati combinati con evidenti segni di bruciato.

L'edificio di Fase 3 era il più grande e testimoniava apparentemente le più diverse attività coprendo più aree dell'acropoli. All'interno delle sicure mura di fortificazione trovavano alloggio il deposito di grano, la produzione tessile, e la produzione di ceramiche. Ad ovest vi erano magazzini contenenti grandi *pithoi*¹⁶, ovvero giare per immagazzinare vettovaglie come cereali, semi, vino ed olio. I resti di queste ceramiche si sono conservati sotto le pareti di mattoni di argilla crollate; in taluni casi sono state addirittura ritrovate tracce carbonizzate dei prodotti contenuti, come grano ed orzo. Fu durante questa fase, forse, che gli abitanti fortificarono la collina, come dimostrano i lunghi tratti di mura a nord, ad est ed a sud, che definiscono il perimetro dell'acropoli. Recenti scavi sul bordo settentrionale dell'altipiano hanno trovato vani creati da mura di sperone, aderenti al muro di terrazzamento nord, che supportavano la fortificazione¹⁷. Occorre comunque considerare che i risultati dell'attività di scavo sono, al momento, ancora in corso di studi e, quindi, la stessa suddivisione in fasi potrebbe ancora variare, con l'aggiunta di ulteriori periodi, soprattutto nella sequenza finale.

La natura votiva della zona situata ad ovest dell'altare, è sostenuta dalla scoperta della grande fenditura che corre sotto le mura occidentali degli edifici di Fase 2 e 3. Esistono prove chiare (altare e depositi votivi) che la natura religiosa del sito è proseguita attraverso la seconda fase, ma non è certo che Poggio Colla continuasse a funzionare come santuario anche durante la terza fase. È noto che questa parte dell'Etruria nel III secolo a.C. era stata invasa dai Galli e i siti a nord, come ad esempio Monte Bibele¹⁸, mostrano con chiara evidenza la loro incursione. Del resto il modello insediativo e la cultura materiale di Poggio Colla sono paragonabili non solo a quelli di Artimino¹⁹, all'estremo ovest dell'Agro Fiorentino, ma riscontrano forti analogie con gli insediamenti sulle pendici dell'Appennino bolognese.

5.1.2 Rituale e contesti votivi

La storia del santuario è contrassegnata da una serie di depositi, correlati a riti di fondazione, purificazione o espiazione. La distruzione del tempio arcaico

dall'aspetto monumentale è, per esempio, caratterizzata da testimonianze che sembrano evocare riti di sepoltura degli esseri umani, conferendo così all'edificio una sorta di anima e corporeità metaforiche. Ogni singolo elemento architettonico del tempio risulta rimosso dalla sua collocazione originaria e, in alcuni casi, sepolto in posizione capovolta. A Poggio Colla è, infatti, ampiamente attestata la pratica di capovolgere gli elementi (non soltanto architettonici), quasi come per consegnarli alla terra, in una specie di inversione che ben si addice al possibile carattere *ctonio*²⁰ del culto.

Il cosiddetto 'Deposito della fenditura' è l'esempio principale della pratica del capovolgimento, come si evince da un blocco modellato del podio del tempio (Fase 1), intenzionalmente spezzato e capovolto, posto a chiusura di un'apertura nella roccia, dove probabilmente si svolgevano attività rituali. Accanto al blocco sono stati trovati un anello d'oro ed alcuni fili d'oro²¹ di cui si sono



conservati alcuni frammenti. È evidente che la fenditura fu chiusa dopo la distruzione del tempio, forse per suggellare il passato ed annunciare un cambiamento nel culto. Un'altra testimonianza importante che presenta i due elementi rituali ricorrenti, cioè il capovolgimento e la frammentazione, è il cosiddetto 'Deposito dell'iscrizione'; questi doveva avere un significato purificatorio, dato il ritrovamento delle ossa di un maiale offerto in sacrificio.

Comunque esistono altri elementi che, esibiti nel tempio arcaico, dopo la sua distruzione, furono deposti sottoterra mediante un rituale attento e ben definito. Il deposito conteneva una base piramidale in pietra arenaria sulla quale era stato inciso il nome del suo donatore, fornendo così la prova della presenza nel sito di un'élite colta e ricca, che aveva la facoltà di dedicare la statua esposta sulla base. Vi erano, inoltre, due statuette femminili in bronzo.

Tutti i depositi indicano tappe fondamentali – relative a transizioni, distruzioni o rinnovamenti – della lunga vita di un importante santuario che ha attraversato gran parte della storia etrusca.

Negli ultimi anni il santuario ha prodotto abbondanti informazioni sulle attività rituali che vi si svolgevano. Infatti, come si è detto, ha avuto almeno quattro fasi di occupazione; la prima, identificata da tracce di fondazioni

di capanne, può essere associata a due strati fortemente carbonizzati che precedono la prima architettura in pietra e sono pieni di bucchero e di *buccheroidei*, cioè impasto di bucchero, risalente almeno alla metà del VII secolo a.C.²² Successivamente si sono susseguite tre fasi di costruzione: nella Fase 1, intorno alla fine del VI o V secolo a.C., sull'acropoli fu costruito il tempio monumentale. Questo fu distrutto e sostituito da due complessi a cortile. Nel passaggio dalla Fase 1 alla 2, cioè dal tempio a podio alla struttura a cortile, le parti del tempio sono state trattate ritualmente come si evince dai molti depositi votivi ritrovati in sito. Esistono, infatti, le prove di 10 contesti rituali che forniscono un quadro coerente delle pratiche, specifiche e ricorrenti, quali la frammentazione intenzionale degli oggetti, il loro posizionamento in allineamento con la disposizione assiale del santuario, ed il loro capovolgimento a testa in giù.

Secondo il resoconto degli archeologici possiamo definire:

Contesto rituale 1 o *Fissure Deposit* (CR1) – La grande fessura nella roccia sul lato ovest del cortile che conduce

Fig. 42 – (a sinistra) Foto della grande fessura nella roccia del CR1.

Fig. 43 – (a destra) Foto della fessura dove era la *stips* votiva del CR2.



ad un vuoto sotterraneo sviluppato per una certa lunghezza sotto le pareti ovest del cortile. Dopo la distruzione del tempio di Fase 1 un grande blocco di podio di pietra fu posizionato di fronte alla fessura. Il blocco è stato volutamente rotto, come si vede dai segni di scalpello, e poi ordinatamente capovolto. Accanto ad esso sono stati depositati un anello d'oro fino e lunghi filamenti di filo d'oro che potrebbero essere stati intrecciati in un tessuto. Tali fili sono troppo lunghi per essere stati lasciati cadere accidentalmente, inoltre l'accostamento di un blocco di arenaria modellato e di oggetti d'oro può essere spiegato come una cornice rituale collegata forse al culto *ctonio*²³. Contesto rituale 2 o *Bronze Stips* (CR2) – Si tratta di una *stips*²⁴ votiva depositata ad ovest ed a sud dell'altare di Fase 2, che conferma il valore rituale del basamento di roccia di Poggio Colla. Questo deposito comprende 439 pezzi di bronzo che al livello più basso furono stratificati in tagli nella roccia allineati verso la fessura. È incluso il metallo grezzo nella forma di 'brocche' di fusione, *aes rude* (bronzo non lavorato), e molti oggetti frammentari che appaiono bruciati e, intenzionalmente, tagliati, come pezzetti di bronzo, molto usurati e frammenti abrasivi di tegole e ceramiche di oggetti grossolani, un peso di telaio, una maniglia di vernice nera, e tre frammenti di *skyphos* attico²⁵.

Fig. 44 – (in alto a sinistra) I piccoli pezzi bronzo del CR2.

Fig. 45 – (in alto a destra) Il nascondiglio nella roccia del CR3.

Fig. 46 – (a destra) Lo *Schnabelkanne* in bronzo del CR3.



Le *stips* possono aver avuto una lunga storia deposizionale, i reperti variano nella datazione dall'età Arcaica al periodo Ellenistico. Il trattamento di quelli in metallo testimonia la frammentazione o la rottura deliberata per motivi legati alla credenza sociale o religiosa²⁶.

Contesto rituale 3 o *Schnabelkanne Deposit* (CR3) – Una brocca con beccuccio allungato (*Schnabelkanne*) in bronzo ed un anello sempre di bronzo sono stati accuratamente collocati in una fossa proprio al confine occidentale del cortile di Fase 2 e coperti con pietre tagliate e frammenti di tegola. L'uso di queste brocche nei contesti rituali, in particolare nella divinazione, è ben documentato e l'orientamento della brocca verso nord-sud, in parallelo alla parete ovest del cortile di Fase 2, rammenta l'interesse per l'orientamento associato ai concetti etruschi

di spazio sacro.

Contesto rituale 4 o *Inscription Deposit* (CR4) – Il cosiddetto 'deposito dell'iscrizione' era situato in una stanza nell'angolo nord-ovest del cortile. Un grande cilindro di arenaria, di circa 70 cm di diametro, probabilmente la sommità di una colonna votiva, un altare circolare, o un ceppo, è stato collocato capovolto al centro di una grande fossa insieme a due basi di statua in arenaria, accuratamente posizionate a nord, perpendicolari tra loro ed approssimativamente orientate secondo gli assi dell'altopiano. La base più grande è piramidale, forata nella parte superiore, con una giunzione di piombo per il montaggio di una figurina o di una piccola statua e presenta un'iscrizione²⁷. Un oggetto in bronzo, ritualmente rotto (in due pezzi), insieme con 'ciocche' di filo d'oro intrecciate²⁸,

Fig. 47 – (a sinistra) Foto della base, dalla forma tronco-piramidale, ritrovata nel CR4.

Fig. 48 – (sotto) Studio dell'iscrizione su una delle facce della base del CR4.

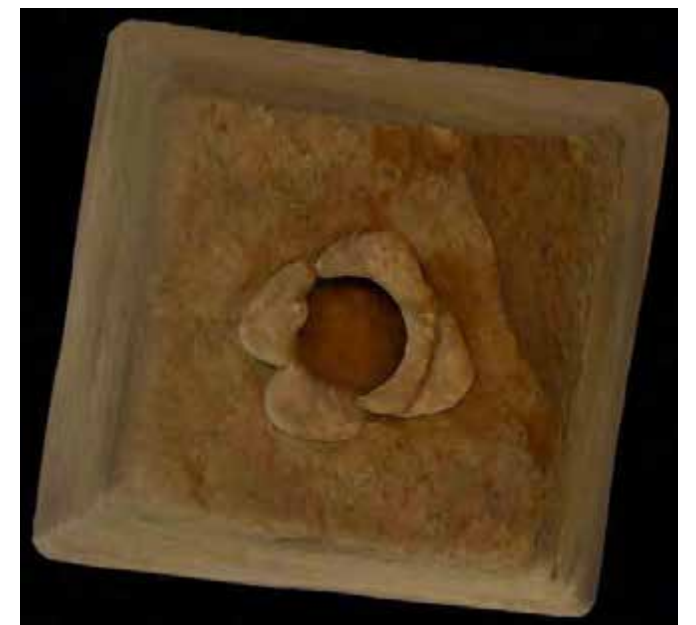


Figg. 49, 50, 51 – Il modello 3D della base ottenuto mediante l'elaborazione fotogrammetrica digitale. A destra: al modello è stata aggiunta la texture restituita dalle immagini.

sono stati collocati a sud.

Ad ovest si trovavano due ciotole di bronzo (*mesomphalic*²⁹). Una di esse è stata volutamente schiacciata e fissata nella terra in posizione verticale. Nel medesimo luogo sono state rinvenute ossa di animali; in particolare il radio e parti di una costola di maiale, nonché il cranio e le vertebre di un mammifero di dimensioni medie. Il loro accurato posizionamento permette di ricostruire la sequenza delle azioni ed il rituale; l'inclusione delle ossa di un giovane maiale può essere ricollegata ad un rito di purificazione.

Il deposito rispecchia le azioni ritrovate negli altri con-



testi a Poggio Colla: il posizionamento degli oggetti a testa in giù, la rottura-frammentazione e l'inclusione di filo d'oro che probabilmente faceva parte di un tessuto dell'*élite*.

Contesto rituale 5 o *Reuse of temple elements* (CR5) – In questo contesto sono stati riutilizzati altri elementi del tempio. Una massiccia base di colonna è stata trovata capovolta nello scavo di fondazione di uno dei muri del terrazzamento sul bordo settentrionale dell'altopiano³⁰. Ancora più ad est sono stati ritrovati cinque blocchi del podio, tagliati secondo la loro lunghezza (alla maniera dei blocchi del Contesto Rituale 7) ed una base di colonna; il tutto è stato riutilizzato per creare una piattaforma, una sorta di struttura, che forse fungeva da altare.

Contesto rituale 6 o *Jewelry Deposit* (CR6) – Il *deposito dei gioielli*³¹ comprende oggetti che erano sicuramente offerte femminili. Esso rispecchia l'inclusione di oro in altri contesti. Ricorrente è l'inserimento di oggetti rotti, in particolare la metà di una bulla, cioè una sorta di amuleto, ed elementi di collane.

Contesto rituale 7 o *Reuse of temple elements* (CR7) – Questo contesto è ancora una volta architettonico, composto da elementi riutilizzati del tempio di Fase 1 e continua a documentare il modello di rottura e rovesciamento collegato alla distruzione di quella struttura. Blocchi del podio, al margine settentrionale della terrazza, sono stati volontariamente tagliati lungo la loro lunghezza e poi capovolti nella fondazione di uno dei muri del terrazzamento a nord. Una serie di lastre di pietra verticali, collocate direttamente di fronte e parallele a questi blocchi, suggerisce un loro possibile ruolo di marcatori di confine.

Contesto rituale 8 o *Victoriati Deposit* (CR8) – Si tratta di un altro contesto³² chiuso, composto da un piccolo *olpe*³³ di vernice nera, forse deliberatamente rotto, che conteneva esattamente 100 Vittoriati Romani d'argento³⁴. Questo è molto più di un tesoro di monete, essa costituisce una deposizione intenzionale, molto probabilmente dopo la distruzione finale di Poggio Colla nel II secolo a.C.

Contesto rituale 9 o *Stone mound at east end of the courtyard* (CR9) – Un mucchio di pietre al confine est del cortile di Fase 3 è simile al Deposito Rituale 8 in cui si possono raffigurare le azioni rituali legate alla distruzione del santuario. La massa di elementi lapidei non è completamente scavata ed attende ulteriori analisi.

Contesto rituale 10 o *Bronze Sheet Deposit* (CR10) – Si tratta di un deposito trovato nell'angolo nord-ovest esterno dell'edificio di Fase 2, dove i grandi conci di arenaria della fondazione formano un angolo ben definito. Qui la fondazione è stata trattata in un modo interessante ed insolito: le tegole di una bacinella in cotto sono state accuratamente disposte in cima al concio d'angolo, quasi come un extra strato di livellamento. È difficile giustificare questa tecnica in quanto il concio angolare è grande, piatto e ben tagliato, quindi non avrebbe avuto bisogno di essere ricoperto da piastrelle. Ad ovest di questo angolo è stato depositato uno strato di bronzo ed ossa di animali sacrificati. Un frammento di lamina di bronzo, di circa 10-15 cm, è stato deliberatamente piegato. Esso conserva ancora un foro di chiodo in un angolo, suggerendo che potrebbe essere stato apposto al fabbricato – forse il tempio di Fase 1 – e si potrebbe ipotizzare che fosse decorato o inciso, anche se attualmente non presenta tracce distin-



guibili. In ogni caso appare trattato ritualmente, ripiegato in un modo tale da ricordare i bronzi, ormai noti, piegati o deformati dalla Civita a Tarquinia³⁵.

Questo frammento è stato depositato con le ossa di tre animali: le mandibole di un giovane maiale e di una pecora, o capra, ed un piccolo osso a punta di un cane o di un lupo³⁶. Le ossa sono chiaramente il risultato di un processo di selezione, le parti degli animali sacrificati, ormai consegnate alla terra o alle divinità del luogo, sono un'ulteriore prova, insieme alla deposizione della lamina di bronzo frammentata e ripiegata, dei rituali di frammentazione che permeano il paesaggio sacro di questo particolare sito. La disposizione degli oggetti, appositamente scelti e sistemati all'angolo nord-ovest della struttura monumentale, è chiaramente un atto rituale: potrebbe trattarsi di un rito di fondazione o anche di un atto propiziatorio.

5.1.3 Interpretazione dei depositi

Nel santuario di Poggio Colla può essere documentato un modello di azioni rituali sistematiche, che include la rottura intenzionale, la manipolazione, o la frammentazione, maggiormente riscontrabili nel blocco del podio nel CR1 e negli oggetti di bronzo rotti del CR4. Notevole in questi due contesti, ma presente in tutto il sito, è l'azione di capovolgimento a testa in giù degli oggetti. Queste due pratiche sono rituali apparentemente affini e, in effetti, risultano attestati altrove nella penisola italiana durante l'Età del Ferro. L'accurato e preciso posizionamento di oggetti, orientati secondo gli assi delle strutture del santuario, si trova sia nel CR3 che nel CR10.

La ricca testimonianza per la religione votiva a Poggio Colla giunge soprattutto da un deposito che ha chiarito la natura religiosa dell'acropoli, quello definito CR4, costi-

tuito da una fossa circolare scavata in una stanza nell'angolo a nord-ovest degli edifici della Fase 2 e 3, in una zona dove recenti scavi hanno ritrovato diversi muri di ciò che potrebbe essere stata la struttura di Fase 1.

Nel centro della fossa è stato posto un grande cilindro di arenaria con in un capo, ovvero un tenone (giunzione a maschio) su una delle sue facce. Questo elemento di pietra è probabilmente la parte superiore di una colonna votiva o di piccolo altare circolare ed il tenone, sul lato inferiore del cilindro, avrebbe tenuto l'elemento in posizione, forse su una colonna di legno. Una volta smantellata quest'ultima, o l'intero altare, l'elemento è stato accuratamente disposto al centro della fossa e capovolto



Fig. 52 – (nella pagina precedente) Orecchini d'oro ritrovati nel CR6.

Fig. 53 - (a destra) Viste del modello 3D realizzato con fotogrammetria digitale della statuetta femminile arcaica. Si noti il particolare foro fra i piedi.



Fig. 54 – Pregiati orecchini femminili in oro ritrovati a Poggio Colla.

Fig. 55 - Lunghi fili d'oro sono stati rinvenuti in diversi contesti rituali.

come di consuetudine.

A nord del cilindro in arenaria, posizionate perpendicolarmente l'una all'altra e orientate secondo gli assi dell'altopiano, vi erano due basi di statue in bronzo. La più piccola, pentagonale ed alta poco meno di 13 cm, presenta un foro nella parte superiore per l'inserimento di una statuetta di bronzo; era orientata in direzione nord-sud. La base più grande, alta 33,5 cm, è piramidale ed è anch'essa forata nella parte superiore. Il suo foro presenta ancora il raccordo di piombo che avrebbe sorretto una statua in bronzo di dimensioni significative. Una faccia reca un'iscrizione, apparentemente arcaica, che svela un nome maschile etrusco³⁷, probabilmente del suo donatore³⁸. Due frammenti di bronzo sono stati collocati sul lato sud del cilindro. È stato anche trovato il manico di un contenitore, volutamente spezzato, insieme a diverse ciocche di filo d'oro intrecciate, come in molti altri contesti rituali del sito. Ad ovest del cilindro è stata rinvenuta una piccola ciotola di bronzo, probabilmente utilizzata per versare una libagione nel momento in cui tutti questi elementi sono stati sepolti. Il posizionamento accurato degli oggetti permette di ricostruire la sequenza del rituale: la colonna, o l'altare, è stata smantellata; la sua parte superiore cilindrica pesante è stata accuratamente posta a testa in giù nel pozzo. Le basi da statua sono state infilate ordinatamente verso nord, mentre i fili d'oro e di bronzo

sono stati collocati a sud. Il 'sacerdote', posizionatosi ad ovest e rivolto verso est, ha versato una libagione collocando la coppa ai suoi piedi sul lato ovest della fossa. Pur riuscendo a ricostruire la sequenza delle azioni non è possibile conoscere il motivo di questa cerimonia. Rimane il dubbio se si trattasse di un normale rito di reclusione di oggetti sacri di un'epoca precedente, o piuttosto il risultato di una distruzione violenta e di saccheggi. La disposizione assiale accurata degli oggetti, in linea con i bordi della terrazza dell'acropoli e la loro gestione apparentemente raffinata ricordano la pratica rituale etrusca dove, almeno in alcuni casi, la cura e l'amministrazione del sacro erano affidate a specifiche personalità³⁹. Molti degli atti rituali attestati nel CR4 lo sono anche nel CR1 e nel CR3. Quest'ultimo, probabilmente un deposito di fondazione della struttura di Fase 2, era un pozzo collocato direttamente ad est della parete ovest del cortile di Fase 2. La fossa è stata ricoperta con una pietra ed una tegola e conteneva una brocca in bronzo, una cosiddetta *Schnabelkanne* – ovvero una brocca con bec-

cuccio – ed un anello di bronzo pesante. La brocca è stata accuratamente posizionata su un lato, anche in questo caso quasi certamente dopo una libagione, ed è di nuovo orientata verso nord-sud, parallelamente alla parete ovest del cortile.

Va detto che questi tipi di brocca si trovano di solito nelle tombe, ma il loro significato rituale è chiaro sul famoso specchio *Chalchas* da Vulci, ora in Vaticano, dove una *Schnabelkanne* è posta ai piedi del veggente mentre scruta le viscere all'altare. Il significato dell'anello è molto più ambiguo.

Tutta la parte occidentale del cortile della Fase 2 è collegata al rito ed alla religione votiva. Nel centro del lungo asse est-ovest del cortile, ed esattamente a un terzo della distanza dalla parete ovest, si trovava un altare di pietra. Tra la parete ovest del cortile e quest'altare vi è una grande fessura che conduce ad una camera sotterranea o *favissa*⁴⁰, questa che corre sotto le pareti ovest del cortile. La fessura è chiaramente naturale e ancora non scavata. Dopo la distruzione e lo smantellamento del tempio di Fase 1 essa è stata ricoperta con un grande blocco di arenaria modellato, facente parte della struttura di Fase 1. Il blocco è stato ben posizionato a testa in giù, presso la fessura e, accanto ad essa, sono stati depositati un anello d'oro fine e lunghi filamenti di filo d'oro. Ancora una volta la combinazione di un elemento architettonico capovolto, di un anello, e di un filo d'oro documentano un'impostazione rituale. Quindi tale contesto, collegato ad una caratteristica naturale (la fessura) suggerisce nuovamente un culto sotterraneo (*ctonio*), forse in relazione ad una divinità femminile. D'altra parte questo tipo di venerazione di una fessura naturale nella roccia non è raro in Etruria e va di pari passo col più noto esempio di Tarquinia⁴¹. All'interno del CR2 non sembra esserci alcuna stratigrafia deposizionale, ma la parte più bassa del deposito è posta sopra un basamento di roccia – ancora una volta abbiamo la prova che la roccia era sacra – in un solco che può essere stato tagliato nella roccia prima che gli oggetti vi fossero depositati. Questo canale, naturale o artificiale che sia, è sorprendentemente simmetrico e crea un asse nord-sud; in altre parole risulta allineato al nord vero invece che ai lati del terrazzamento. L'allineamento è quindi coerente con l'orientamento di Fase 1, ma la *stips* è chiaramente databile ad un momento successivo.

Il canale è comunque anteriore e potrebbe esistere un altro motivo che ha indotto a mantenere un'assialità precedente, come il seguire la direzione che conduce alla fessura e al CR1. In tal modo i due depositi potrebbero essere correlati secondo il culto *ctonio*.

La data esatta del CR2 rimane incerta; l'ipotesi migliore appare quella che colloca il deposito alla fine della Fase 2 - inizio della Fase 3. In tal senso potrebbe trattarsi forse dell'indicazione di una 'fine', una sorta di rituale sigillante il santuario di Fase 2. Di particolare importanza in questo senso è la posizione delle monete che si trovano nella parte superiore della *stips* votiva, indicativa di una specifica azione rituale meglio conosciuta nel nord Europa⁴². È interessante notare, infatti, che la deposizione strutturata di monete si trova in insediamenti e luoghi sacri e può essere associata ad elementi architettonici, quali scavi di fondazione, fossati di recinzione, etc. Nei santuari la deposizione di monete diventa un atto rituale, forse un modo di sigillare e consacrare spazi sacri.

L'elevato numero di monete di Poggio Colla deve certamente indicare una perdita non casuale, ma una deposizione selettiva. Inoltre le questioni metodologiche sollevate dall'analisi della deposizione di monete durante l'età del ferro in Europa sono qui applicabili. Il modo in cui le monete potrebbero essere state collocate o disperse intorno alla parte superiore del CR2, così come in altre parti del sito, solleva le questioni circa il rituale, l'identità etnica e la natura degli altri depositi a Poggio Colla e negli altri siti Etruschi del nord verso l'ultimo periodo etrusco, un momento di fermento sociale e miscelazione etnica. Potremmo così cominciare a sospettare che i depositi di gioielli d'oro (CR6) e di monete d'argento (CR8) non siano riserve, ma abbiano natura dedicatoria. La scoperta di questa serie di depositi votivi ci ha portato a rivalutare alcuni contesti precedentemente scavati e ad esaminare tali eventi ambigui come lo smantellamento o la distruzione del tempio di Fase 1. Non sapremo mai perché quest'ultimo sia stato distrutto, se la sua distruzione è stata accidentale o intenzionale, ma quello che possiamo dimostrare è che dopo questo evento seguirono una serie di azioni rituali.

Niente relativo alla Fase 1, salvo i muri di fondazione, sembra essere stato lasciato *in situ*. I blocchi del podio e gli elementi architettonici sono stati riutilizzati nelle fon-



Fig. 56 – (in alto) Planimetria del santuario di Poggio Colla con l'inserimento dell'ortofoto dello scavo PC45, ricavata dal modello 3D.

Fig. 57, 58 – (sopra, da sinistra a destra) Viste del CR7 in situ, rispettivamente dalle posizioni B e A indicate nella planimetria (Fig. 56). Il riuso degli elementi architettonici durante diverse fasi di vita del santuario è un rituale frequente a Poggio Colla.

Fig. 59 – (nella pagina a fianco) Foto del CR5 in situ dalla posizione C indicata nella planimetria (Fig. 56). Sono evidenti i cinque blocchi del podio tagliati ed una massiccia base di colonna circolare.

dazioni successive, quasi sempre volutamente capovolti. Un esempio illuminante di questo tipo di riutilizzo è costituito da una serie di blocchi di podi posti nella parte inferiore della parete del terrazzamento settentrionale. Tali blocchi sono collocati direttamente di fronte ad una serie di piccole lastre di pietra verticali che sembrano aver segnato un confine, forse il limite nord del santuario in una fase iniziale. La sacralità del confine delineato è rafforzata dall'atto rituale del collocamento di elementi del tempio distrutto.

L'intero santuario sembra essere un dialogo di atti rituali che rafforzano l'ordine razionale dello spazio sacro.

L'esempio deposizionale è interessante: la maggior parte dei depositi rituali si trovano all'estremità occidentale del cortile ma, più precisamente, sono ad ovest di un ipotetico asse nord-sud, che interseca l'altare di Fase 2. Questo suggerisce di dividere l'area sacra in zone, sulla base di un asse cardinale che definisce la pianificazione della Fase 1 e che viene ribadito dal canale del CR2, ma che potrebbe anche trovare prosecuzione nelle fasi successive, nonostante il ri-orientamento della disposizione architettonica lungo linee diverse.

Un altro deposito degno di nota è il CR9: il cumulo di pietre, alcune delle quali sono chiaramente elementi architettonici, posto al limite orientale del cortile di Fase 3. Gli ultimi studi hanno rivelato che appartiene all'esatta fine del sito, forse parte di una post-distruzione rituale.

Dall'analisi di tutti gli elementi emerge una perplessità legata alla quasi assenza di terrecotte, dato che l'unica ritrovata è un'antefissa tardo arcaica, emersa dagli scavi italiani del 1992, nella fondazione del muro di terrazzamento settentrionale. Questo potrebbe ricondurre a rituali di distruzione documentati nel tardo VI secolo a.C. a Murlo⁴³, ma con una sostanziale differenza, poiché Poggio Colla è chiaramente un santuario che continuò a funzionare bene anche dopo la distruzione del tempio di Fase 1. Quindi possiamo affermare che la sepoltura rituale di queste parti del tempio segna una transizione piuttosto che una fine, anche se è interessante notare che le pietre del tempio sono trattate come sacre, proprio come i rivestimenti di sostegno fittili (di terracotta) più comunemente trovati in depositi rituali. Anche l'angolo sud-ovest della struttura di Fase 2 può essere stato trattato ritualmente, ma in maniera diversa e meno decisa. Di-



rettamente a sud ed adiacente al blocco all'angolo sud-ovest, una piccola ciotola piatta, apparentemente con i suoi bordi volutamente tagliati, è stata posta a testa in giù. Questo contesto appare meno esplicito ritualmente rispetto ad altri, ma suggerisce comunque rituali simili – la frammentazione o l'alterazione di un oggetto, il rovesciamento o il capovolgimento a testa in giù, verso la terra – che si trovano in altri contesti rituali di Poggio Colla. Nell'ambito dell'azione rituale che è stata in precedenza definita come performativa, ripetitiva, e riproducibile, la rotazione intenzionale di un oggetto capovolto, sia un blocco di podio che un vaso, ha un significato particolare che simbolicamente è forse associato ad un fine.

Così com'è il santuario dell'acropoli di Poggio Colla sta cominciando a rivelarsi attraverso una serie di contesti archeologici che documentano in modo deciso la ricchezza e la complessità della pratica rituale etrusca.

Fra l'altro possiamo notare che due depositi votivi (CR4 e CR10) sull'acropoli sono conformi ai modelli di deposizione animale rituale visti in tutto il mondo antico. Essi contengono mammiferi domestici comuni ben documentati in tutta la civiltà mediterranea. La distribuzione delle parti del corpo in ogni deposito fornisce anche indicazioni di un trattamento differenziato degli animali prima della sepoltura. Così come il frazionamento di un foglio di bronzo d'importanza simbolica, e la successiva reclusione di una sua parte, rendendolo inutilizzabile attraverso il taglio e la piegatura, identifica ciò che appartiene agli dei e ciò che appartiene al genere umano, in modo tale da incatenare gli esecutori umani in un contesto più ampio, divinamente abitato ed ordinato.

5.1.4 Ritrovamenti

A conferma dell'importanza di Poggio Colla sono stati individuati lungo i versanti dell'altura i resti di un vasto insediamento del VII secolo a.C. con una cava, alcune fornaci e un'area di produzione di ceramica risalente al IV-III secolo a.C., il tutto verosimilmente al servizio del luogo sacro.

Il rilievo avviato nel Podere Funghi, una terrazza a nord-est dell'acropoli, ha messo in luce, nelle stagioni di scavo 1998-99, una grande quantità di ceramiche del periodo ellenistico rintracciabili tramite arature profonde. I successivi scavi, più in basso, hanno rivelato in un tumulo le impronte di almeno 4 forni di ceramica. Questi presentano una forma a goccia, con circa un metro e mezzo di diametro e sono, probabilmente, coevi del tumulo; venivano utilizzati per la produzione di semplici ciotole di almeno tre diverse dimensioni. Sopra tale terrazzamento era stata costruita una grande struttura riconducibile al III secolo a.C., poi demolita durante la distruzione del complesso di Fase 3. Essa poggiava su fondamenta analoghe a quelle delle successive fasi dell'acropoli, ma molto più profonde e massicce. Finora si è scoperta, come già detto, una grande stanza rettangolare (circa 10x4 metri) con un

focolare circolare all'estremità sud, intorno al quale sono stati trovati vasi di cottura. La lunghezza esatta rimane incerta, poiché la parete nord è andata perduta a causa dell'erosione. Comunque appare verosimile che superasse le dimensioni ritrovate, come suggerisce un canale di drenaggio costituito da pietre allineate che corre per quasi tre metri in direzione nord.

Sotto il pavimento della stanza sono state rinvenute ampie sezioni di piastrelle che, insieme alla terra carbonizzata, potrebbero rappresentare i resti di un edificio precedente⁴⁴. L'area ad ovest di questa stanza potrebbe essere stato un portico. I resti di queste piastrelle sono di particolare importanza per lo studio dei tetti in Etruria; in particolare i frammenti di una tegola con il buco per il passaggio del fumo è stata trovata in due forni distinti. Queste tipologie di piastrelle sono note da citazioni letterarie in siti greci e italiani. Dal confronto con altri ritrovamenti, in particolare nella zona di Acquarossa nel viterbese, si notano alcune analogie; comunque la tegola del podere Funghi è stata trovata in una zona chiaramente collegata ai forni ed alla produzione di ceramica, e questo ne suggerisce un uso legato alla ventilazione del forno.

Sul versante nord-ovest dell'altopiano sono emersi numerosi esempi di bucchero decorato ed impasto attribui-



Fig. 60 – (nella pagina precedente) Frammento di bucchero con incise figure di animali.

Fig. 61 – (a destra) La piccola e raffinata testa maschile in bronzo.

bili al VII ed inizi del VI secolo a.C., tra questi un *askos*⁴⁵ di bucchero (VII sec. a.C.) a forma di uccello acquatico, si tratta di ceramica di *élite* di notevole qualità.

Questa zona del sito sembra essere stata una cava. Le ceramiche sono parte di uno strato profondo e pesantemente bruciato, suggerendo che la cava potrebbe essere servita come un tumulo per un'abitazione limitrofa, precedente dato anche dal fatto che queste terrazze appaiono come luogo ideale per un piccolo insediamento, in quanto vi è una sorgente naturale nelle vicinanze.

5.1.5 Ceramiche

Le prime testimonianze dell'attività sul sito sono fornite dal ricco assemblaggio di bucchero orientalizzante e primo arcaico rinvenuto in gran parte in una falda che corre sotto le mura del terrazzamento nord. Esso è datato intorno al tardo VII fino al primo VI secolo a.C., gli esempi includono coppe e calici di alta qualità con manico ad ala. Esso costituiva il tipo di vasellame più usato, spesso realizzato in forme eleganti e decorate con motivi impressi a forma di animali, piante e disegni geometrici.

La quantità e la qualità del bucchero proveniente da questa zona, tra cui un numero eccezionalmente elevato di *skyphoi*⁴⁶ con maniglie ad ala, fanno ipotizzare che, almeno alcuni di questi oggetti, siano stati prodotti a livello locale, mentre l'*askos* di bucchero inciso, rinvenuto nel versante nord ovest, è precedente, forse un'importazione dall'Etruria sud-centrale. Inoltre il bucchero decorato ha buone somiglianze con quello ritrovato nelle immediate vicinanze di Artimino, e paralleli più ampi con il Volterrano ed il Senese; esempi di bucchero del VI secolo si ritrovano anche nell'Etruria Padana.

In tutto il sito è visibile la ceramica a vernice nera con un repertorio di forme quasi identico a quello ritrovato sul Monte Bibele, nonché nelle tombe di Monte Tamburino, così come nel sito dell'abitazione a Pianella di Monte



Savino. Predominano per numero ciotole, tazze e vasi per mescolare. Il carattere della ceramica è simile anche a quello recuperato a Frascole presso Dicomano.

I frammenti, generalmente di piccole dimensioni, con pochissimi profili interi, sono associati alle strutture di Fase 2 e 3 dell'acropoli. Le forme di quest'area includono coppe con le maniglie 'pseudo-triangulari', tazze con maniglie orizzontali, ciotole emisferiche, *skyphoi* sud-dipinti, *kantharoi*⁴⁷, *paterae*⁴⁸ e *olpai*⁴⁹. Va precisato che l'*olpe* di Poggio Colla contenendo i *victoriati*, insieme ad altro materiale contestuale, fornisce un punto di riferimento cronologico per l'utilizzo di tale forma.

5.1.6 Statuette di bronzo

Tutti i bronzetti ritrovati, compresa la raffinata testa maschile con caratteri ellenizzanti, dopo essere stati esposti durante le fasi più antiche del santuario (Fasi 0 e 1) devono essere stati oggetti di riti che dovevano aiutare a superare l'evento della distruzione del grande tempio arcaico.

Anche le statuette ritrovate potrebbero essere state intenzionalmente restituite alla terra: in particolare due di esse, una femminile e l'altra maschile, databili intorno al VI secolo a.C., potrebbero essere state deposte

in posizione supina, con la volontà di evocare un vero e proprio rito di sepoltura. Un'altra figura, che presenta evidenti tracce di fuoco, faceva parte di una stipe votiva di più di 400 oggetti in bronzo, molti dei quali risultano essere stati rotti intenzionalmente.

La presenza di così numerosi bronzi, spesso di elevata qualità, attesta la ricchezza del santuario ed i suoi attivi rapporti commerciali. Fra le statuette in bronzo ve ne sono due femminili: se una è di un tipo piuttosto diffuso nell'area compresa tra Fiesole e Arezzo, l'altra è, invece, molto particolare per stile e antichità – 600 a.C. circa – e per la forma della base, dove un foro tra i piedi, al posto dell'usuale elemento da incastro, permetteva all'oggetto di essere esposto.

Le centinaia di bronzi rinvenuti comprendono bronzo grezzo sotto forma di 'brocche' di fusione e numerosi pezzi, possibilmente *aes rude*. Ci sono anche numerosi frammenti che indicano palesemente ciò che sono stati gli oggetti: lastre di bronzo, alcune con chiodi, attrezzi e pezzi decorativi che facevano parte di alcuni pezzi più grandi. Molti di questi presentano tracce deformi e pesanti di bruciatura sulla loro superficie; alcuni sembrano essere stati deliberatamente tagliati. In un solo caso esiste un oggetto intero: una figurina arcaica votiva con la sagoma fortemente usurata ed abrasa, forse bruciata.

Alcuni di questi pezzi sono frammenti di evidente valore,

oggetti attribuibili all'*élite*, per esempio uno splendido leone arcaico, un accessorio per un tripode di bronzo o per un grande vaso, il cui montaggio è chiaramente votivo, giacché comprende tre statuette: la figurina arcaica, i piedi di un'altra figura ed una bella testa maschile in bronzo, forse un Apollo, scoperta nel 1995.

La preponderanza di bronzi e la mancanza di reperti considerevoli di ceramiche o di terracotta è caratteristico dell'Etruria settentrionale, in particolare della regione tra Firenze e Bologna, così come l'inclusione di molto bronzo grezzo, brocche ed eventualmente *aes rude*, è parallela al vicino santuario di Monte Falterona, dove le figurine e le armi sono state mescolate con un mucchio di bronzo grezzo e di monete. Ma questo non è un tipico deposito di statuette degli Etruschi del nord, si tratta, piuttosto, di un deposito secondario di oggetti che sembrano essere stati deliberatamente tagliati, frammentati, e forse bruciati. Ciò potrebbe far pensare piuttosto ai resti di una distruzione violenta, quel che è rimasto ben nascosto sotto il cortile del complesso di Fase 3, dopo il saccheggio del santuario.

Fig. 62 – (sotto) La conca del Lago degli Idoli sul Monte Falterona.

Fig. 63 – (nella pagina a fianco) Le principali statuette in bronzo rinvenute a Poggio Colla.



I reperti, tuttavia, variano dall'età Arcaica al periodo Ellenistico. Includono oggetti che sono probabilmente contemporanei con il tempio di Fase 1: per esempio, la testa maschile, la statuetta in piedi e il leone. Ma l'assemblaggio comprende anche oggetti, ad esempio monete, databili alla fine del III e l'inizio del II secolo a.C., fino al termine della lunga storia del santuario.

5.1.7 Ruolo della donna

Il ruolo attivo delle donne è ampiamente documentato nel santuario⁵⁰ e la recente scoperta della 'Stele di Vicchio' rafforza l'ipotesi che almeno una parte del sito fos-

se dedicata ad una divinità femminile ctonia o della fertilità, forse associata alla dea etrusca Uni, equivalente alla romana Giunone. D'altra parte Poggio Colla ha rivelato un culto incentrato su una fenditura nella roccia considerata sacra.

Inoltre la scena di parto riprodotta su un vaso di bucchero e le statuine di bronzo rinvenute rafforzano l'ipotesi che l'altura fosse dedicata ad una divinità femminile.

Su un frammento di bucchero si notano due incisioni che rappresentano una figura umana pettinata con una lunga treccia, cosa che ne permette l'identificazione in un soggetto femminile. La donna tiene un braccio alzato con il quale sorregge un oggetto non identificato. Ha le ginocchia sollevate sopra la vita e due forme circolari poste



Fig. 64 – (a sinistra) La scena di parto rappresentata sul frammento di bucchero.

Fig. 65, 66 – Particolare e studio del disegno della scena di parto.

Anche il deposito votivo del IV secolo, costituito da un gruppo di diciotto oggetti in metallo, in oro e pietre dure, tra cui numerose paia di orecchini e due pendenti induce ad ipotizzare che una tale concentrazione di gioielli rappresenti il dono, da parte delle donne, alla divinità locale. Al ruolo della donna fa pensare anche la grande quantità di oggetti usati nel villaggio di capanne del VII secolo, tra cui alcuni vasi di bucchero, che si sono conservati sotto gli edifici in pietra di età successiva.

Il ritrovamento di vasellame da mensa, attestato per ogni momento di vita del santuario, suggerisce che le pratiche religiose venissero accompagnate dal consumo di cibo e bevande. Un'importante ritrovamento è il suddetto frammento di bucchero con scena di parto che decorava una ciotola o una coppa, cioè tipici vasi da banchetto.

In contesti databili al IV secolo a.C. sono stati recuperati due tipi di vasi per bere: la *kylix*, tazza bassa, tipicamente maschile, e lo *skyphos*, coppa profonda, più propriamente femminile; questo porta a pensare che gli uomini e le donne etrusche banchettassero insieme.

tra le sue gambe rappresentano il figlio della donna nel momento stesso della sua nascita. Questa immagine di parto, estremamente rara, risale al 625-500 a.C. ed è la più antica che sia mai stata ritrovata nel Mediterraneo antico⁵¹.

Non esistono altre raffigurazioni etrusche di questo evento: a Tarquinia (Viterbo) sono state rinvenute immagini femminili nella stessa posizione, ma senza bambino, ed a Castel San Mariano (Perugia) è stata ritrovata l'immagine di una gorgone accovacciata nella stessa postura tra due leoni.

Altri oggetti testimoniano l'importante ruolo della donna e quali fossero le sue attività all'interno del santuario. Fra queste possiamo affermare con certezza che la filatura e la tessitura della lana e delle fibre vegetali, come il lino, erano tra le attività domestiche peculiari della donna etrusca, anche di elevato ceto sociale, come attestano alcune antiche scene figurate e i frequenti ritrovamenti negli scavi.

Inoltre il ritrovamento di numerosi strumenti per filare le fibre, come i fusi e le fusaiole, e per tessere le stoffe, come i pesi da telaio, testimoniano l'importanza di questa attività durante tutta la vita del santuario. I fili d'oro, ritrovati in due contesti votivi, lasciano supporre che questi tessuti fossero riccamente decorati e svolgessero un ruolo nelle attività rituali.

5.2 Ritrovamento della Stele iscritta

Il recente ritrovamento di una stele in pietra arenaria iscritta⁵² nelle fondazioni del tempio monumentale arcaico – inserita lungo una delle file di blocchi che dovevano sostenere il fronte orientale della struttura del podio – pare costituire un'ulteriore prova del rituale praticato a Poggio Colla.

Mentre i dieci contesti votivi sono datati ad epoche successive alla distruzione del tempio di Fase 1, essendo probabilmente collegati al trauma che ne derivava o alle seguenti fasi di attività religiose ospitate nel sito, il luogo di rinvenimento della Stele, ovvero l'ultima posizione in cui essa era stata deposta, segna un momento di transizione cruciale del sito: la trasformazione da un santuario all'aperto ad una tipologia di struttura monumentale nuova, quale espressione di maggiore potere religioso e politico.

Considerando che il tempio monumentale si data al 500-480 a.C. sulla base – come già anticipato – di alcune ceramiche e di un'antefissa, è infatti molto probabile che la Stele fosse esposta nel santuario di fase pre-monumentale (Fase 0), quale simbolo di autorità connesso appunto al periodo più antico. Il suo riuso nelle fondazioni del tempio, di difficile spiegazione, potrebbe essere riferibile, invece, alla stessa pratica di rimpiego degli elementi architettonici, attività che ha caratterizzato la vita del santuario di Poggio Colla. A maggior ragione, quindi, la presenza di numerose iscrizioni sulla superficie della Stele rende tale documento un *unicum* per la spiegazione del culto ivi praticato, nonché per la conoscenza stessa dei rituali religiosi degli Etruschi, della loro epigrafia e forse anche della loro lingua.

Di superficie irregolare e con sezioni trasversali poligonali variabili, la forma della Stele di Vicchio, con una parte inferiore abbozzata ed una superiore convessa e ben sagomata, presenta analogie con le stele centinate – come dice Adriano Maggiani⁵³ – caratteristiche della zona di Volterra, della Valdelsa e di Fiesole. Rispetto a quest'ultimo luogo, in particolare, viene fatto riferimento a due monumenti funerari: la stele di 'larth ninie' che mostra sulla faccia principale la rappresentazione di un guerriero, stante verso sinistra, ed un'iscrizione onomastica dello stesso defunto che corre in senso verticale⁵⁴; la



Fig. 67 – La stele di 'larth ninie', detta anche Stele Buonarroti (poiché passata in proprietà dell'omonima famiglia fiorentina), era già nota nel Settecento come proveniente da Fiesole. Tale monumento funerario in arenaria grigia, di forma rettangolare (alta 138 cm, larga 41,5 cm, di spessore variabile da 9 a 19 cm) con il lato superiore arrotondato ed una breve risega in basso, presenta un aspetto particolare rispetto alle altre stele fiesolane conosciute (Cfr. P. Perazzi, G. Poggesi, S. Sarti (a cura di), *Ombra degli Etruschi. Simboli di un popolo fra pianura e collina*, ed. Edifir, Firenze, 2016, p. 88).

Fig. 68 – La cosiddetta stele da Panzano, descritta di marmo, è oggi nota solo grazie ad un disegno settecentesco (pubblicato in Gori 1737-1743, tav. XVI, IV). Il monumento è privo di immagini ma presenta l'iscrizione di un certo 'laru arianas' ('mi larus: arianas: anasnies klan:').

stela aniconica da Panzano riportante, invece, un'iscrizione ad andamento ricurvo. Nonostante le somiglianze fra il materiale da costruzione, la forma, nonché il solito territorio di riferimento, la Stele rinvenuta a Poggio Colla non rientra, tuttavia, in senso stretto – come dice Gregory Warden⁵⁵ – nella categoria delle 'pietre fiesolane', distinguendosi da quest'ultime innanzitutto per la sua funzione votiva, piuttosto che funeraria. D'altronde il differente trattamento del materiale lapideo fra le due parti della Stele di Vicchio – la ruvida superficie inferiore



re contrasta la sua accurata levigatura superiore – pare suggerire che il monumento in origine venisse utilizzato verticalmente, con un ‘tenone’ inserito nella terra ed una parte maggiore (alta circa 75 cm) in vista⁵⁶. Quindi l’ipotesi della sua successiva collocazione orizzontale nelle fondamenta del tempio arcaico, così come è stata rinvenuta, corrobora il carattere dedicatorio attribuito alla Stele. Quest’ultima, in virtù del testo iscritto, potrebbe contenere la dedica del santuario o di una parte di esso, altrimenti costituire addirittura la *lex arae* del luogo di culto, una serie cioè di prescrizioni da adottare durante lo svolgimento delle cerimonie, in connessione con un altare o altri elementi sacri.

Infatti il monumento di Vicchio, nonostante non sia de-

corato⁵⁷, esibisce una lunga iscrizione, forse la più lunga su pietra finora conosciuta in Etruria.

L’estrema alterabilità del materiale lapideo, a grana fine, su cui le numerose sequenze di lettere sono iscritte ne costituisce, però, il principale limite per la loro completa lettura e, di conseguenza, la corretta interpretazione. D’altra parte una porzione del testo inciso⁵⁸ è andata irrevocabilmente perduta a causa delle condizioni in cui il monumento stesso è stato collocato per circa 2500 anni, ma anche le iscrizioni epigrafiche restanti non sono affatto ben visibili. Di conseguenza ciò che rimane, seppur permettendo di avanzare alcune considerazioni ed ipotesi interpretative sul monumento e riguardo il contenuto testuale ivi rappresentato, costituisce *de facto* una sfida a



Fig. 69 – (nella pagina precedente) Planimetria dell’acropoli di Poggio Colla. Viene individuato il luogo dove è stata rinvenuta la Stele di Vicchio.

Fig. 70 – (sopra) Foto della Stele di Vicchio in situ.

Fig. 71 – (a destra) La Tegola di Capua.

partire dalla sua stessa trascrizione. Il testo, sviluppandosi soprattutto sui fianchi della Stele, accuratamente smussati, corre rispettivamente su due fasce longitudinali che ne seguono il contorno⁵⁹; mentre altri due gruppi più brevi di lettere – la cui continuità con il precedente testo è incerta – sono incisi sulla faccia piana frontale.

Attraverso un preliminare tentativo di lettura diretto⁶⁰, l’identificazione più chiara delle varie parti di testo, nonostante lo stato precario della superficie in arenaria e la complessa *ordinatio* delle iscrizioni leggibili, ha permesso di ottenere alcune importanti informazioni inerenti la redazione ed il contenuto testuale esibito dalla Stele. La grafia lungo i bordi arrotondati è ‘pseudo-bustrofedica’⁶¹, ovvero essa procede su una prima linea con lettere diritte in una direzione e prosegue sulla seconda, invece, con caratteri capovolti e nella direzione opposta.

In Etruria esistono solo due monumenti iscritti con un dotto di scrittura analogo: il cippo di Tragliatella, il cui testo riguarda la delimitazione di una zona di culto da parte di un magistrato⁶², e la Tegola di Capua, ove la redazione di un lungo testo attraversa l’ampia superficie della lastra in terracotta⁶³. Entrambi i documenti, databili rispettivamente al 530 ed al 475 a.C., sono di natura religiosa, ma la tegola di Capua – come osserva lo stesso Maggiani⁶⁴ – ne consente un maggiore confronto. Infatti anche nella Stele di Vicchio l’esecuzione delle lettere incise, seppure più breve e con diversa impaginazione, pare ferma ed irregolare. Soprattutto nelle fasce longitudinali laterali, lo svolgimento di una grafia vergata con sicurezza e cura suggerisce la continuità testuale fra i solchi adiacenti incisi; qui inoltre le parole sono ben distinte l’una dall’altra, grazie ad un sistema di divisione a tre punti disposti verticalmente. Infine l’identificazione nel gruppo di testo iscritto su tre linee, nella parte superiore



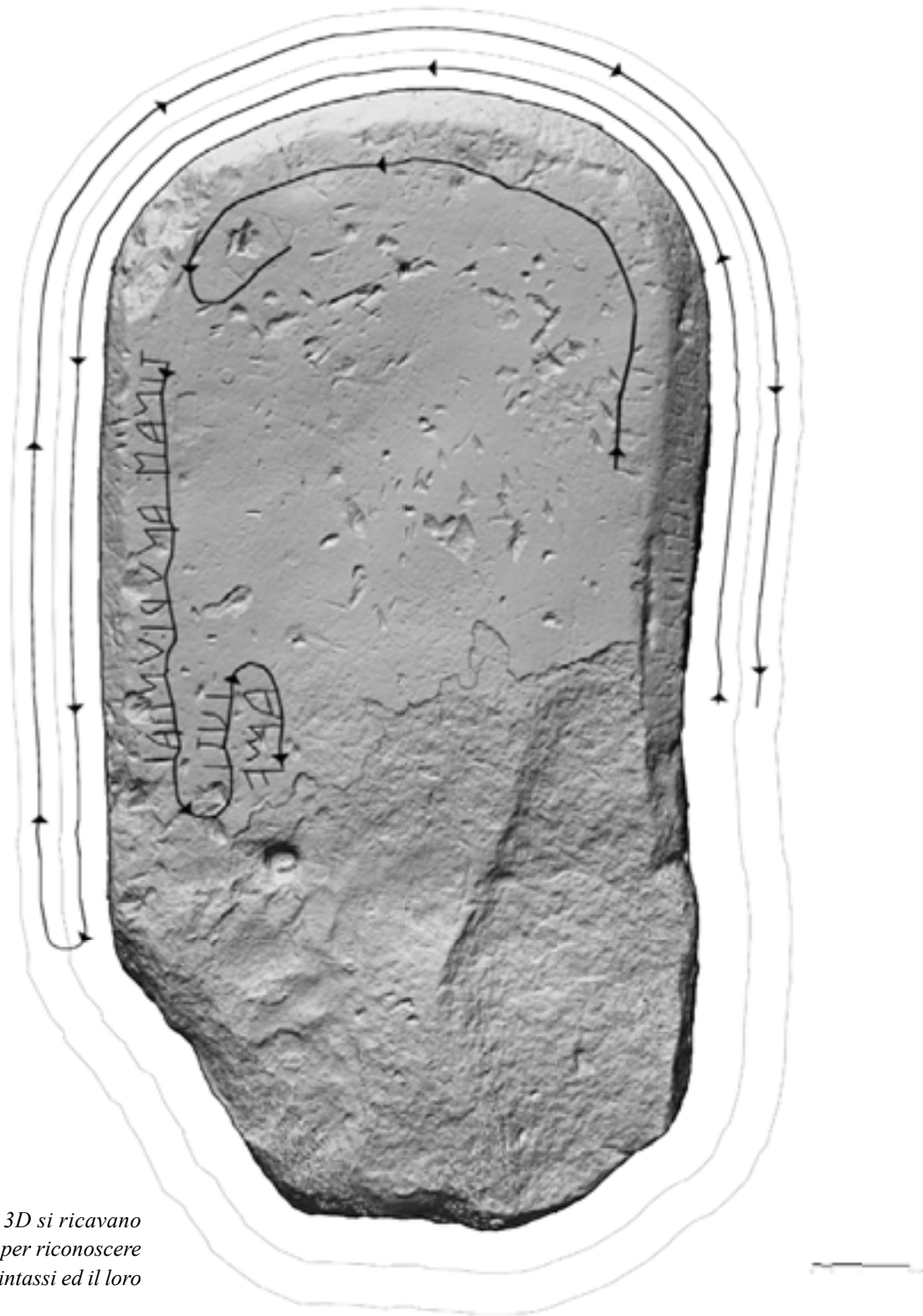


Fig. 72 – Dal modello 3D si ricavano maggiori informazioni per riconoscere i segni iscritti, la loro sintassi ed il loro orientamento.

sinistra della faccia frontale, della parola ‘tinās’, genitivo del nome della suprema divinità del *pantheon* etrusco – ‘Tinīa’ appunto – e del nome della sua consorte ‘Unīal’, quale titolare del culto di Poggio Colla, ha consentito una traduzione preliminare⁶⁵ che confermerebbe da subito il presunto carattere dedicatorio della Stele.

Tuttavia, se da un lato ciò sembrerebbe offrire un indizio importante ai fini interpretativi, dall’altro la parziale porzione di testo considerata rispetto a tutte le altre iscrizioni – a partire da quelle già visibili – non esclude la possibilità che nel testo vi siano ulteriori indicazioni di altro genere, riferite, ad esempio, alle pratiche sacre ivi esercitate. Tale quesito può essere risolto solo attraverso una ricostruzione autentica del monumento, capace di estrarne con certezza tutte le informazioni utili per la sua completa interpretazione. Ciò è possibile solo se tutte le informazioni vengono opportunamente catturate e codificate, permettendo di leggere con massima precisione metrica e morfologica lo spessore sub-millimetrico ed i grafemi del testo iscritto sulla superficie delle Stele. Tutti requisiti che oggi esigono forme di *output* che solo un progetto di rilievo 3D può garantire. A maggior ragione quando l’eccezionalità della Stele di Vicchio, una delle più importanti scoperte etrusche

degli ultimi decenni, può fornire non solo informazioni preziose riguardo l’evoluzione del culto a Poggio Colla, ma anche dati fondamentali per la comprensione della religione, della scrittura e della lingua etrusca, non basta prendere in considerazione solo le proprietà fisiche di base, come la dimensione ed un’approssimazione soggettiva della forma o del modello.

Occorre bensì programmare un progetto di *management* interdisciplinare completo che dimostri il valore della terza dimensione nel campo dell’indagine archeologica: la possibilità di comprenderne il movimento e la dinamica, cioè il suo uso e la sua funzione.

Fig. 73 – Particolare della Stele di Vicchio, dove appaiono riconoscibili i caratteri etruschi iscritti.



Note

1. Cfr. G. Sanesi, *Geologia e morfologia dell'antico bacino lacustre del Mugello, Firenze: con una nota sull'industria litica di A. Palma di Cesnola*, Pubblicazioni CNR, vol. 162, ed. Arti Grafiche Pacini Mariotti, 1965, pp. 84.
2. Nello specifico 'dalle dorsali minori dei rilievi di Sasso di Castro, di Montebeni, e dai rilievi e Monti dell'Arenaria-Marnosa di Firenzuola, Marradi, Palazzuolo, a nord', vedi Piano di Indirizzo Territoriale con valenza di piano paesaggistico (PIT) della Regione Toscana, scheda 7, Mugello, p. 8, (<http://www.regione.toscana.it/>).
3. Tracce antropiche significative di un insediamento stagionale databile a 25-30.000 anni fa sono state rinvenute presso il Lago di Bilancino [Cfr. B. Aranguren, A. Revedin (a cura di), *Un accampamento di 30.000 anni fa a Bilancino* (Mugello, Firenze), ed. Origines, Firenze, 2008, 248 pp.]; si veda anche i ritrovamenti conservati presso il Centro di Documentazione Archeologica di Sant'Agata (<http://www.museisantagata.it/>). Per il periodo protostorico vedi P. Perkins, *On the Edge of Etruria: Early Etruscans in Appennines*, Accordia joint lecture with the UCL Institute of Archaeology, 3 maggio 2016, Londra.
4. Cfr. R. Chellini, *Firenze. Carta Archeologica della Provincia: Valdarno superiore, Val di Sieve, Mugello, Romagna toscana*, in 'Journal of Ancient Topography', supp. 7, ed. Congedo, Galatina (LE), 2013, pp. 334.
5. Cfr. R. Chellini, *Un'area di passaggio tra l'Etruria tirrenica e l'Etruria adriatica: il territorio fiiesolano (IX-III sec. a.C.)*, in 'Journal of Ancient Topography', n. 23, 2013, pp. 129-154.
6. Il *Mugello Valley Archaeological Project* (MVAP) è un consorzio di Università americane ed europee, fra cui: Southern Methodist University, Franklin and Marshall College, The University of Texas at Austin, The Open University (UK), Franklin University Switzerland (CH), etc.
7. Tale luogo era stato precedentemente indagato da una squadra italiana di archeologi dal 1968 al 1972.
8. Cfr. P. Perkins, *On the Edge of Etruria: Early Etruscans in Appennines*, Accordia joint lecture with the UCL Institute of Archaeology, 3 maggio 2016, Londra.
9. Sebbene finora sia stata identificata solo una capanna, in una zona a sud dell'altopiano (PC 21) fra l'altro non interessata da costruzioni successive, la presenza di alcune tracce di buche

- di palo altrove nel sito pare suggerire la probabile esistenza di strutture primitive di tale tipo [Cfr. P.G. Warden, *The Vicchio Stele and its Context*, in 'Etruscan Studies 2016. Journal of the Etruscan Foundation', vol. 19(2), ed. De Gruyter, USA, 2016, p. 209].
10. Elemento decorativo che termina le testate delle tegole utilizzate per i tetti dei templi greci, etrusco-italici e romani. Il primo inventore sarebbe stato, secondo Plinio il Vecchio, Butade, vasaio di Sicione, che lavorava a Corinto. Le antefisse più antiche sono in genere di terracotta dipinta, ma non ne mancano in pietra o marmo. Tra i motivi decorativi più usati, palmette, fiori, leoni e figure mitologiche.
 11. La linea dei blocchi, insieme ad altri resti delle strutture di fondazione, era alloggiata nel taglio di uno strato di terra scura, che includeva una grande quantità di vasi in bucchero da banchetto databili nei periodi orientalizzante e arcaico, fornendo un *terminus post quem* al terzo quarto del VI secolo a.C. [Cfr. P.G. Warden, *Una scoperta recente: la stele iscritta del santuario etrusco di Poggio Colla*, in P. Perazzi, G. Poggesi, S. Sarti (a cura di), 'Ombra degli Etruschi. Simboli di un popolo fra pianura e collina', ed. Edifir, Firenze, p. 84.].
 12. Come ben documentato dagli scavi archeologici, il confine settentrionale dell'altopiano potrebbe essere stato terrazzato per realizzare una piattaforma strutturale significativamente più grande e presumibilmente più stabile. Il settore centrale di tale piano è stato artificialmente livellato, coprendo aree di roccia a vista ed alzandosi di circa 40 cm; fu probabilmente anche costruito il muro meridionale del terrazzo. Nonostante il sito sia stato ricostruito secondo linee diverse ed interamente su un nuovo asse nella seconda e terza fase, l'attività religiosa è continuata. Un altare è stato costruito nel centro del cortile di Fase 2, e diversi depositi votivi sono stati ritrovati al margine ovest della struttura (Cfr. P.G. Warden, M.L. Thomas, A. Steiner, G. Meyers, *Poggio Colla: a N Etruscan settlement of the 7th-2nd c. B.C. (1998-2004 excavations)*, in 'Journal of Roman Archaeology', vol. 18, 2005, pp. 254-255).
 13. Cfr. P. Chiarucci, T. Gizzi (a cura di), *Area Sacra di Satricum. Tra scavo e restituzione*, in 'Catalogo della mostra Museo Civico Albano', 1985, ed. Paleani, p. 37.
 14. Nelle fondazioni del primo tempio fu scoperta, inoltre, una vasta stipe votiva che conteneva materiale databile intorno al VI secolo a.C. L'ulteriore identificazione di un semplice edificio primitivo, il cosiddetto *sacellum*, che aveva le fondamenta in pietra, le pareti in argilla cruda e legno, il tetto coperto di

- tegole e forse due colonne ai fianchi della porta, ha rilevato che il fra la il *sacellum* ed il successivo tempio di prima fase vi fosse, invece, il medesimo orientamento. Sotto le fondazioni del *sacellum* sono state, infine, rinvenute le testimonianze dell'età del ferro consistenti nel fondo di una capanna ovale con focolare entro il perimetro del *sacellum* ed ulteriori tre capanne al di fuori di esso (Cfr. Ivi).
15. Forse circa nel 188/187 a.C.
 16. Plurale del termine greco *pithos* (*πίθος, πίθοι*) che significa grande giara la quale, generalmente in ceramica e con una forma caratteristica, serviva per immagazzinare scorte di prodotti di vario genere, compresi quelli alimentari. La ceramica infatti era un materiale ideale per conservare le provviste, isolandole dall'acqua, dallo sporco e da insetti e roditori. La presenza di questi contenitori fu comunemente associata all'attività di un centro amministrativo e commerciale. Il *pithos* è meglio noto nella sua forma latina come *fuscus*.
 17. ... dal momento che un denso imballaggio di macerie riempie alcuni dei compartimenti. Questo stile di costruzione è simile alle mura di fortificazione scoperte a Poggio Civitella. (Cfr. L. Donati, *Gli scavi di Poggio Civitella (Montalcino, Siena) 1993-1998*, in 'Etruscan Studies', vol. 6, 1999, p. 157).
 18. Il monte Bibele è un massiccio montuoso del medio Appennino bolognese, facente parte del bacino del torrente Idice, la cui vetta massima, 617 metri sul livello del mare, è situata nel territorio del comune di Monterenzio (BO). Il toponimo *Bibele* deriva dal verbo latino *bibo* che significa bere; questa montagna, infatti, nonostante la scarsa altezza, era nota sin dall'antichità, col nome di *monte Bibulo* per essere molto prolifica di sorgenti perenni di acqua dolce e sulfurea. Il massiccio è un importante sito archeologico, con diversi insediamenti attribuibili agli Etruschi ed ai Galli Boi.
 19. Ad Artimino, nel comune di Carmignano (Prato), era presente un insediamento urbano etrusco piuttosto importante che fiorì dal VII secolo fino al periodo ellenistico.
 20. 'Ctonio' nella mitologia classica è attribuito di divinità sotterranee il cui culto era collegato con la vita terrestre o sotterranea; divinità ctonia per eccellenza fu Ade per i Greci, Dite per i Latini. Il termine è usato in storia delle religioni per indicare la stessa connessione con la terra anche per figure di altre civiltà religiose.
 21. ... che permettono di postulare un particolare tipo di tessuto.
 22. Il bucchero e il *buccheroide* impasto è allo studio dal prof. Phil Perkins, Open University (UK).

23. Va detto che questo tipo di venerazione di una fessura naturale in un ambiente urbano è attestata a Tarquinia.
24. Stipe (dal lat. *stips stipis* cioè offerta votiva) – In archeologia, il complesso degli oggetti votivi rinvenuti sia in depositi e ripostigli che sparsi in un luogo sacro (per lo più in scarichi ove erano gettati già anticamente quando il loro cumulo era divenuto eccessivo).
25. Lo *skyphos* è un tipo di vaso greco, una profonda coppa per bere con due piccole anse, solitamente orizzontali, impostate appena sotto l'orlo; il piede è basso o del tutto assente. In ambito attico lo *skyphos* assume pareti leggermente più spesse, con anse robuste e piede a toro.
26. Nel contesto della preistoria balcanica la frammentazione è una pratica comune che crea incatenamento tra gli individui nel contesto delle strutture sociali, 'l'incatenamento e l'accumulo sono le due principali pratiche che sostengono le relazioni sociali'. Nel nostro caso la frammentazione sembra essere più strettamente connessa al rituale. (Cfr. J. Chapman, *Fragmentation in Archaeology. People, Places, and Broken objects in the prehistory of South Eastern Europe*, London-New York 2000, pp. 5-6).
27. L'iscrizione è stata pubblicata da Camporeale che la fa risalire a dopo il 450 a.C. (G. Camporeale, *Ager Faesulanus: Poggio Colla*, in 'Studi Etruschi', n. 75, 2012, pp. 187-188).
28. Questi erano ancora parte di un tessuto.
29. Così chiamata per la sua manopola centrale o '*omphalos*' cioè ombelico.
30. Una serie di blocchi del podio sono stati collocati in modo parallelo a questo muro; questi blocchi sono state scavati in precedenza (1968-1972) e non siamo in grado di stabilire con certezza se sono stati messi a testa in giù o sul lato destro in alto.
31. Cfr. A. Castor, *An Early Hellenistic Jewelry Hoard from Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in 'Memoirs of the American Academy in Rome', vol. 54, American Academy in Rome, 2009, pp. 245-262.
32. Cfr. M.L. Thomas, *One Hundred Victoriati from the Sanctuary at Poggio Colla (Vicchio di Mugello): Ritual Contexts and Roman Expansion*, in 'Etruscan Studies', vol. 15(1), 2012, pp. 19-93.
33. L'*olpe* era una brocca, con corpo allungato e imboccatura rotonda, diffusa nella ceramica corinzia e attica, derivante da prototipi metallici (le due rotelle presenti all'attaccatura dell'ansa rappresentano le borchie necessarie al fissaggio). È un tipo di *oinochos* (in greco antico *οἰνοχόη*, da *οἶνος* 'vino')

e *χέω* 'versare') vaso simile alla brocca, utilizzato per versare vino o acqua, con profilo continuo e con ansa unica e alta che si estende al di sopra dell'imboccatura.

34. Il 'vittoriato' (latino *victoriatus*) era una moneta d'argento emessa durante la Repubblica romana nel periodo 221 a.C. - 170 a.C. Il diritto della moneta mostrava la testa di Giove ed il rovescio mostrava la Vittoria che poneva una corona su un trofeo e con l'iscrizione 'Roma' in esergo (cioè fuori dal disegno principale).

35. Dove è stata ritrovata anche una venerazione simile di una fessura naturale nella roccia, cosa non rara in Etruria: M. Bonghi Jovino, C. Chiaramonte Trerè (a cura di), *Tarquinia testimonianze archeologiche e ricostruzione storica. Scavi sistematici nell'abitato. Campagne 1982-1988*, Roma 1997, pp. 217-220.

36. Il sacrificio del cane è ben attestato in Etruria. Per la più recente discussione vedi L.B. Van Der Meer, *Etrusco Ritu, Case studies in Etruscan Ritual Behaviour*, Lovain 2011, p. 130. Per l'identificazione dei resti degli animali vedi P. G. Warden, *Giving the Gods their Due: Ritual Evidence from Poggio Colla*. With an appendix by Angela Trentacoste, in 'Francesco Nicosia. L'archeologo e il soprintendente. Scritti in memoria. Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana', supp. 1, n. 8/12, Firenze, 2012, pp. 249-257.

37. Per la pubblicazione dell'iscrizione vedi G. Camporeale, *Ager Faesulanus: Poggio Colla*, op. cit., pp. 187-188.

38. Dato che sono indicati sia il nome che il cognome, è possibile pensare che il donatore fosse un membro dell'*elite* colta e ricca. Questi avrebbe offerto la statua esposta sulla base alla divinità.

39. Il più famoso esempio, raccontato da Livio (V, 22, 3-8), è la statua di Giunone a Veio, gestita dai romani 'con timore religioso perché, secondo la consuetudine degli Etruschi, a nessuno era permesso di toccarla tranne che ad un sacerdote appartenente ad una certa famiglia'.

40. Termini latini come *favissa* indicano serbatoi sotterranei o cantine vicino al tempio, per l'acqua o per gli utensili sacri non più in uso.

41. Gli altari posti sopra le aperture sotterranee o *bothroi* non sono insoliti nei santuari etruschi, ad esempio nella zona di Portonaccio a Veio o alla Punta della Vipera. (Cfr. M. Bonghi Jovino e C. Chiaramonte Trerè, op.cit., 1997, pp. 217-220).

42. Le monete sono datate circa al 200-190 a.C., ovvero successivamente alla Seconda Guerra Punica, suggerendo quindi che la *stips* è stata riempita nella fase finale della vita del santuario.

43. Poggio Civitate è un'area archeologica etrusca, presso

Murlo (Siena). Il sito archeologico è oggetto da decenni di una campagna di scavi da parte della University of Massachusetts Amherst (USA).

44. Il sondaggio iniziale rivela almeno 5 tipi di piastrelle di varia misura: tre da Poggio Colla, e due da Podere Funghi.

45. La parola *askos* letteralmente significa 'vaso' in lingua etrusca ed è riferito ad un recipiente in terracotta a forma di animale (toro, anatra, bue) che veniva utilizzato per versare il vino. L'*askos* nel greco antico significa, invece, 'tubo' (plurale -*askoi*) ed è una antica forma vascolare greca in ceramica per versare piccole quantità di liquidi oleosi, utilizzata come unguentario o per riempire le lampade ad olio. Il nome col quale in epoca moderna si designa tale forma è convenzionale, esso era originariamente usato per le otri da vino in pelle d'animale, come se ne vedono spesso sulle rappresentazioni vascolari a tema dionisiaco, e viene adoperato in epoca moderna per designare questa forma vascolare in base alla somiglianza morfologica.

46. Lo *skyphos* (in greco: *σκύφος*, *skyphos*, plurale *skyphoi*) è un tipo di vaso greco, una profonda coppa per bere con due piccole anse, solitamente orizzontali, impostate appena sotto l'orlo; il piede è basso o del tutto assente.

47. Il *cantaro* o *kantharos* (dal greco *κάνθαρος*, latino *cantharus*) era una coppa per bere diffusa in ambito greco ed etrusco. Nella sua forma più tipica e diffusa è caratterizzata da due alte anse verticali, che si estendono in altezza oltre l'orlo incurvandosi verso di esso, un vaso profondo, leggermente distinto in una parte superiore e una inferiore, quest'ultima distinta dallo stelo da una modanatura ad anello, con un diametro che mediamente misura tra i 10 e i 15 cm.

48. *Phiale* o *patera* era un piatto, di ceramica o metallo, poco profondo usato per bere, soprattutto in un rituale come una libagione. Spesso presenta una rientranza a bulbo (*omphalos*, 'ombelico') nella parte inferiore centrale per facilitarne la presa. Nel contesto culturale etrusco il termine più comune è *phiale* in riferimento a forme greche, mentre *patera* è di ambiente romano.

49. L'*olpe* era una brocca, con corpo allungato e imboccatura rotonda, diffusa nella ceramica corinzia e attica, derivante da prototipi metallici (le due rotelle presenti all'attaccatura dell'ansa rappresentano le borchie necessarie al fissaggio). È un tipo di *oinochoe* con profilo continuo e con ansa unica e alta che si estende al di sopra dell'imboccatura. Veniva usata per versare il vino.

50. Cfr. G. E. Meyers, *Weaving as Worship: Women and Ritual at the Etruscan Site of Poggio Colla (Vicchio)*, in '111th

Annual Meeting of the Archaeological Institute of America', Anaheim.

51. Cfr. P. Perkins, *The Bucchero Childbirth Stamp on the Late Orientalizing Period Shard from Poggio Colla*, in 'Etruscan Studies', vol. 15(2), 2012, pp.146-201.

52. Durante la campagna di scavo di luglio 2015 (sigla si scavo 2015-001).

53. Cfr. A. Maggiani, *The Vicchio Stele: The Inscription*, in *Etruscan Studies 2016*, in 'Journal of the Etruscan Foundation', vol. 19(2), ed. De Gruyter, USA, 2016, p. 220.

54. Vi è incisa l'iscrizione (*larθia niniés* è letteralmente traducibile in 'io sono di Larth Ninie') recante, al genitivo, prenome e gentilizio del personaggio, nel quale deve individuarsi un capo aristocratico dotato delle insegne del suo potere. Dal punto di vista della rappresentazione questa stele appare da accostare alla serie di stele volterrane, che si caratterizzano per l'estremità superiore arcuata e per le quali sono stati individuati modelli in ambito siro-fenicio e anatolico, la cui introduzione nell'Etruria settentrionale molto probabilmente deve attribuirsi all'avvento delle maestranze ioniche. La rappresentazione e in particolare l'abbigliamento (con un perizoma) che prevede le gambe completamente nude e per l'armamento costituito esclusivamente da armi di offesa, quali una lancia ed un'ascia, tale stele sembra avvicicabile a quella volterranea di Avile Tite, dalla quale si distingue peraltro il carattere di più evidente ionicità del modellato, soprattutto della testa (Cfr. G. Cateni, *Segni d'Etruria. La scrittura etrusca fra VII e I secolo a.C.*, Catalogo della Mostra, Museo Archeologico Villa Guerazzi, Cecina (Li), 2005, p. 52).

55. Cfr. P.G. Warden, *Una scoperta recente: la stele iscritta del santuario etrusco di Poggio Colla*, op. cit., p. 83.

56. Su entrambi i fianchi, in posizione spesso allineata, alcuni incavi (in tutto se ne contano sette), la maggior parte dei quali di forma pressoché semi-circolare, suggeriscono inoltre che la Stele, quando eretta, poteva essere stata sostenuta da un qualche tipo supporto. Il maggiore di questi incavi è situato, invece, nella parte inferiore della faccia frontale iscritta.

57. Non vi è alcuna prova di decorazione sulla superficie della Stele, ma nella porzione superiore della faccia frontale iscritta si nota la precisione di un piccolo foro centrato fra le molteplici ammaccature distribuite in ordine sparso.

58. ... che per intero pare fosse costituito da 200 lettere circa (Cfr. A. Maggiani, *The Vicchio Stele: The Inscription*, op. cit., p. 220).

59. Il fatto che la parte superiore della Stele sia convessa con

i bordi smussati ed esibisca iscrizioni a grafia 'pseudo-bustrofedica' a partire da entrambi i fianchi, fa presupporre la continuità primitiva del testo lungo l'intero spessore. Purtroppo l'evidente abrasione del bordo superiore impedisce irrimediabilmente la visualizzazione della completa redazione del testo iscritto. D'altronde pare che i bordi siano stati appositamente smussati per incidervi le lettere, suggerendo in tal modo l'intenzionalità con cui è stato creato il manufatto.

60. Cfr. A. Maggiani, *The Vicchio Stele...*, op. cit., pp. 220-224.

61. La scrittura bustrofedica è una scrittura che non ha una direzione fissa. L'etimologia della parola, derivando dal greco *boustrophedon* (avverbio composto da *bous* 'bue' e *strephein* 'volgere'), indica un andamento analogo al solco che viene tracciato dal vomere in un campo. Di norma cioè si susseguono righe con caratteri diritti procedenti da destra verso sinistra e righe in cui essi procedono, capovolti, da sinistra verso destra (Cfr. AA.VV., *Scrivere Etrusco. Dalla leggenda alla conoscenza. Scrittura e letteratura nei massimi documenti della lingua italiana*, ed. Electa, Milano, 1985, p. 72).

62. Cippo 'di confine' rinvenuto in località Tragliatella sulla strada che collegava *Caere* (Cerveteri) e Veio è datato al VI secolo a.C. (Roma, Museo di Villa Giulia). Secondo un recente studio di G. Colonna doveva essere situato in origine davanti ad un altare, appartenendo quindi ad un'area sacra, non lontano appunto dal confine fra le due città [Cfr. G. Colonna, *Il cippo di Tragliatella (e questione connesse)*, in 'Studi Etruschi', 71, pp. 83-109].

63. Dall'insieme dell'esame testuale riportato da Francesco Roncalli, è stato confermato che la Tegola di Capua contiene un rituale funerario, con menzioni di operazioni culturali (offerte, libazioni, e forse sacrifici) dedicate a divinità indiscutibilmente di natura infera (come *leθam*, *calu*, etc.) (Cfr. AA.VV., *Scrivere Etrusco. Dalla leggenda...*, op. cit., p. 73).

64. Cfr. A. Maggiani, *The Vicchio Stele...*, op. cit., p. 220.

65. Secondo Maggiani la lettura di tale gruppo di testo – (*vacat*)*tin*as: *θ(?)anuri:unial(?) / ε γ ι: zal / ame (akil?)* – potrebbe avere la seguente traduzione approssimativa: 'Di Tinia (per Tinia) nel xxxx di Uni / xxxx (oggetti) due / deve (akil?) essere'. In altri termini, Uni sarebbe il titolare di una scrittura sacra (forse indicata dall'espressione *thanuri*) in cui sono stati collocati – o in cui esistevano – due elementi (arredamenti/ornamenti o doni votivi?) per il suo sposo, Tinia, che ha un posto di particolare enfasi nell'iscrizione, poiché parola di apertura della prima riga (Cfr. *Ibidem*, p. 223).



6. Stele di Vicchio: management del progetto di documentazione

6.1 Scelta metodologica: dall'intervento di restauro al progetto di rilievo 3D

La Stele etrusca di Poggio Colla, nell'aspetto in cui è stata rinvenuta durante la campagna di scavo presso il sito omonimo a Vicchio nel luglio 2015¹, presentava peculiarità tali da suscitare subito un grande interesse fra gli archeologi. Di superficie irregolare e con sezioni trasversali poligonali variabili il manufatto scoperto, interamente in pietra arenaria, mostrava già una parte inferiore abbozzata ed una superiore, invece, finita, convessa e ben sagomata. Da una prima misurazione diretta, le due facce maggiori presentavano un rapporto dimensionale di circa 2 a 1 poiché, nonostante la notevole quantità di residuo terroso, la lunghezza e la larghezza massime misuravano rispettivamente 1.26 e 0.66 m; mentre lo spessore era di circa 0.20 m.

Lungo i bordi smussati della parte superiore, in particolare, la presenza di iscrizioni in parte già visibili – prima del restauro se ne riconoscevano circa 70 – oltre ad essere elemento caratterizzante l'oggetto, ha rappresentato un'eccezionale fonte di indagine anche per comprenderne la sua stessa funzione. La possibilità di apprezzare in modo preciso il contenuto della stele, nonché la sua autentica forma, ha richiesto un attento intervento di ripulitura assieme ad operazioni di rilievo tridimensionale integrato. Del resto è ben noto che lo studio delle epigrafi è argomento di grande interesse per la ricerca archeologica; la loro accurata individuazione è essenziale per l'interpretazione del contenuto, per la catalogazione e la documentazione delle stesse². Nel caso in oggetto, l'esigenza di impiegare tecniche di rilevamento tridimensionale non invasive, capaci di fornire una rappresentazione digitale delle iscrizioni di esiguo spessore – variabile da 3 mm fino a misure sub-millimetriche – si è resa più che mai necessaria³.

D'altronde la scelta di non ricorrere a metodi di rilievo invasivi è apparsa un'esigenza *a priori*, considerando la

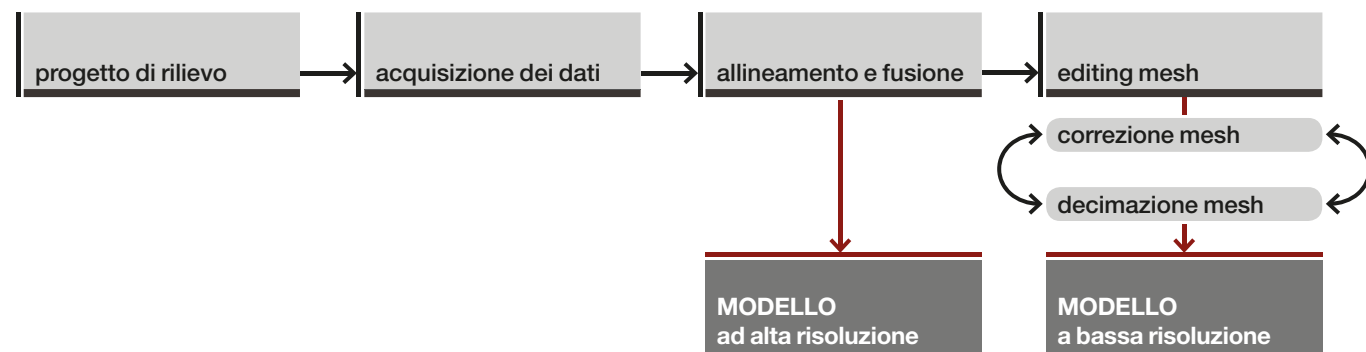
fragilità del materiale di cui è fatta la Stele e le condizioni precarie della sua stessa superficie⁴. Ciò, in altri termini, ha escluso *de facto* la possibilità di ricavare calchi – da realizzare con carta o altri materiali come il silicone – che avrebbero potuto inevitabilmente lasciare residui, alterare o creare danni allo strato superficiale, oppure di redigere un disegno apografico a contatto diretto, tramite supporto trasparente, che avrebbe comunque implicato l'interpretazione del rilevatore⁵.

La definizione del progetto di rilievo 3D ha avuto così lo scopo di offrire una sicura corrispondenza con l'originale ed esiti metrici precisi, tali da poter sia documentare la forma della stele e le sue caratteristiche geometriche durante le fasi di restauro conservativo, che fornire un dispositivo attraverso cui poter leggere il misterioso contenuto testuale iscritto. Più che mai in questa circostanza è, infatti, occorso considerare il documento etrusco non solo quale 'contenitore di parole', ma anche per le sue medesime potenzialità di testimonianza, inerenti, oltre alla grafia, la materia, la redazione, la traduzione testuale, etc.⁶ In altri termini, la Stele si mostra davvero quale doppio sistema rappresentativo finalizzato alla trasmissione di un significato – o forse molteplici – e, quindi, di un contenuto attraverso cui poter convalidare l'identificazione dell'oggetto in ciò che è stato rappresentato.

Si capisce, dunque, come la scelta dei parametri durante la stesura del progetto di rilievo tridimensionale sia stata dettata, innanzitutto, dalla stessa ragione per cui maggiormente è interessato avere il 3D. In tale caso, infatti, lo scopo è stato quello di poter disporre di una rappresentazione fedele della morfologia dell'oggetto che fosse anche in grado, però, di far apprezzare il dettaglio metrico delle varie iscrizioni sulla superficie in arenaria, permettendo così di far leggere compiutamente l'apparato epigrafico etrusco di non facile visualizzazione.

Così la metodologia da adottare per la realizzazione del

Fig. XVI – Nelle pagine precedenti, vista fotografica, con l'impiego della luce radente, della Stele di Vicchio.



modello 3D della Stele ha dovuto consentire un duplice risultato: da una parte un modello per l'analisi scientifica – quindi ad alta risoluzione – che mantenesse una massima fedeltà delle caratteristiche morfologiche dell'oggetto reale, garantendo una precisione sub-millimetrica; dall'altra un modello avanzato (a bassa risoluzione) che, opportunamente semplificato nella sua tessitura *mesh* superficiale, potesse essere facilmente fruibile, ad esempio, per poter essere inserito nella piattaforma espositiva di un museo virtuale per una sua completa visualizzazione ed esplorazione.

Una volta recuperata dal sito di scavo grazie all'impegno del funzionario archeologo e del personale tecnico dell'ormai Ex-Soprintendenza Archeologia della Toscana, oltre che per opera di una ditta specializzata per la rimozione di opere d'arte, la Stele viene conservata presso

Fig. 74 – (sopra) Il diagramma a blocchi sintetizza il flusso di lavoro attraverso cui realizzare il modello tridimensionale sulla base dei dati acquisiti con uno scanner a triangolazione, nella loro doppia valenza d'uso, come documentazione scientifica (modelli ad alta risoluzione) e come contenuto per il museo virtuale interattivo (modelli a bassa risoluzione).

Fig. 75 – (in basso a sinistra) Foto della Stele in situ, subito dopo il ritrovamento.

Fig. 76 – (in basso a destra) A fine luglio 2015, avvertita dal concessionario, la Soprintendenza ha curato il recupero dell'oggetto che è risultato di notevole difficoltà, considerate le ragguardevoli dimensioni ed il peso della Stele - nonché la presenza di una iscrizione a caratteri etruschi. Il recupero ha richiesto l'intervento di una ditta specializzata per la rimozione di opere d'arte dotata di mezzi meccanici idonei, considerato il luogo impervio e di difficile accessibilità (a destra).



Fig. 77 – (sopra) Foto del primo sopralluogo al Centro di Restauro a Firenze con l'esperto di lingua etrusca, prof. Rex Wallace (University of Massachusetts Amherst, Classics Department, USA).

Fig. 78 – (sotto) Foto della Stele. Sulla sua superficie sono ben visibili i targets circolari, posizionati per eseguire il rilievo strumentale e fissati con colla removibile ad acqua.



il Centro di Restauro del suddetto Ente a Firenze⁷. In questa sede, pertanto, si sono svolte tutte le operazioni di studio, documentazione e rilievo.

Fino dal primo sopralluogo effettuato presso il Centro fiorentino, si è resa necessaria la definizione di una rete di riferimento sulla superficie della Stele, attraverso cui poter mantenere una sorta di informazioni fisse, misurate e ben riconoscibili, sull'oggetto durante tutte le varie operazioni di studio da programmare. D'altronde, da un punto di vista pratico ma anche logistico, la gestione di un oggetto pesante, delicato e di non piccole dimensioni – come la Stele – ha esatto massima cautela da parte degli studiosi, affinché ciascuna manovra di spostamento subita per la sua collocazione idonea – obbligatoriamente variabile ai fini dell'avanzamento degli interventi di ripulitura e documentazione – fosse eseguita in piena sicurezza.

La scelta di distribuire sulla superficie della Stele 17 *targets* circolari (con diametro di 1 cm), fissandoli con colla removibile ad acqua, è apparsa condizione indispensabile ai fini di un rilievo tridimensionale preciso e coerente, che fosse confrontabile in base ad un sistema di riferimento misurato 'permanente', ma anche per la stessa messa in

scala del modello 3D richiesta, ad esempio, nel *processing* fotogrammetrico. Infatti, oltre a documentare lo *status* del manufatto prima, durante e dopo la fase di restauro, attraverso la fotografia con luce radente, l'impiego di metodi complementari di rilievo, quali la fotogrammetria ed il *3D scanning* con strumentazione laser a triangolazione, è stato finalizzato ad ottenere un'accuratezza sub-millimetrica. Così la scelta di utilizzare la fotogrammetria digitale per documentare lo stato di fatto pre-restauro della Stele è stata motivata dalla speditezza, economicità e completezza di tale metodo in relazione alla qualità dell'*output* ottenibile, quale modello 3D con *texture* in forma digitale contenente tutti i dati necessari per una precisa documentazione del ritrovamento⁸. L'impiego invece di un avanzato sistema

laser a triangolazione, seppure incapace di descrivere la ricchezza fornita dal contenuto radiometrico della Stele, è stato ritenuto maggiormente opportuno nella fase di post-restauro poiché, garantendo la rilevazione dell'oggetto con un'alta densità di informazioni 3D, è apparso strumento *ad hoc* per restituire, e fare quindi apprezzare, gli spessori sotto il millimetro delle numerose iscrizioni che caratterizzano la superficie della Stele⁹. Del resto, in aggiunta all'estrema precarietà mostrata da quest'ultima, il suo aspetto esteriore, privo di contrasti cromatici, non si dimostrava particolarmente utile, in assenza di effetti di luce obliqua di volta in volta diversi, per l'individuazione delle peculiari informazioni provenienti dalle porzioni superficiali iscritte.



In tale contesto, anche la scelta di una tipologia di restauro, piuttosto che un'altra, pare assumere fondamentale importanza. È apparso idoneo, infatti, adottare un intervento di ripulitura in grado di rimuovere la parte terrosa depositata sopra la superficie della stele, senza alterare il materiale di costruzione e conservando la morfologia delle molteplici tracce iscritte, sia epigrafi che altri segni.

Così, la decisione presa dal restauratore¹⁰ di eseguire impacchi di polpa di carta con acqua distillata e tensioattivo, è risultata perfettamente adeguata, riuscendo a restituire alla Stele di Poggio Colla, prezioso patrimonio etrusco, l'antico aspetto.

6.2 Costruzione del modello 3D della stele prima del restauro

Per la documentazione della Stele nell'aspetto in cui questa è stata ritrovata – perciò prima di qualsiasi intervento di ripulitura – è stato eseguito un rilievo fotogrammetrico con fotocamera digitale *reflex* (SLR) Nikon 7100 con sensore CMOS da 24.1 Megapixels e impiegando un obiettivo da 35 mm con focale fissa¹¹.

Per la modellazione fotogrammetrica 3D della Stele è stato, invece, utilizzato *Agisoft PhotoScan*, pacchetto *software* commerciale che – basato sulla tecnologia di ricostruzione *multi-view* – è in grado di operare autonomamente con un numero elevato di immagini, dimostrandosi efficace anche in assenza di condizioni controllate.

La strategia adottata durante la fase di acquisizione delle immagini è stata progettata posizionando la Stele su un carrello elevatore manuale al centro di un ambiente – in modo da garantire maggiore spazio di ripresa utile intorno all'oggetto – e segnando a terra 20 posizioni (con angolo

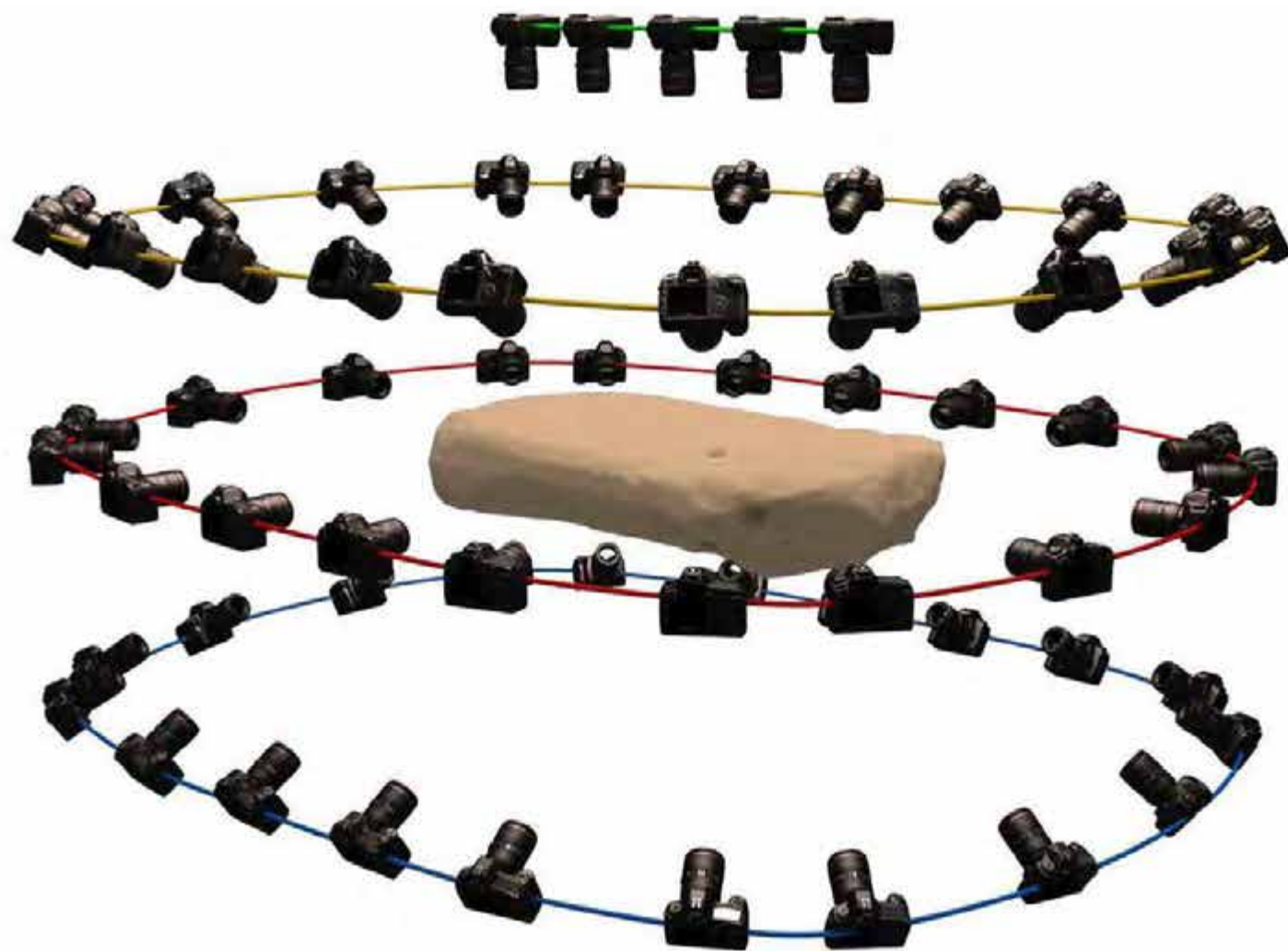
Fig. 79 – (nella pagina a fianco) La Stele nel Laboratorio del Centro di Restauro. Foto del set per l'acquisizione delle immagini della Stele per il processing fotogrammetrico. La campagna fotografica è stata eseguita utilizzando un cavalletto, per evitare i possibili movimenti della fotocamera che avrebbero condizionato sfavorevolmente la nitidezza degli scatti.

Fig. 80, 81 – (a destra) Foto della Stele durante le delicate manovre di capovolgimento.

di rotazione, passo e distanza dall'oggetto costanti) dove collocare, di volta in volta, il cavalletto con la fotocamera per la ripresa digitale. Ovviamente, una volta terminata l'acquisizione fotografica di un lato dell'oggetto, quest'ultimo è stato attentamente imbrigliato e capovolto affinché potessero essere ripetute le medesime operazioni anche sul lato opposto.

La strategia di *imaging* è stata, quindi, orientata ad acquisire una notevole quantità di dati, attraverso una distanza pressoché invariata, ma lungo direttrici di ripresa orizzon-





tali ed oblique differenziate verticalmente, in modo tale da ottenere una copertura totale della Stele, evitando zone d'ombra all'interno del modello.

La documentazione dell'irregolarità superficiale complessiva che caratterizzava la Stele, soprattutto prima della fase di pulitura dal residuo terroso, ha richiesto dunque un *set* di foto articolato che garantisse *in primis* di costruire un modello 3D dettagliato catturandone l'autentico dato cromatico¹². Per tale ragione, e viste le condizioni di luce sfavorevoli di un ambiente chiuso con illuminazione artificiale – quindi peggiore, ai fini fotogrammetrici, rispetto a quella naturale – come del resto quello in cui si sono

eseguite le varie fasi di rilievo della Stele, è stato necessario acquisire un numero sovrabbondante di immagini (quasi 2000 scatti). Ciò, pur comportando un maggiore lavoro di organizzazione, in termini di memorizzazione ed archiviazione dei dati, è risultato comunque utile anche nei confronti della risoluzione stessa del prodotto finale. Quest'ultima infatti, dal momento in cui non esiste un controllo diretto, in fase di acquisizione dati – né tantomeno sulla densità di punti o sulla qualità del modello ottenibili – è proporzionale al numero di immagini originali. Perciò, l'effettiva valutazione della documentazione prodotta può essere effettuata solamente al termine della fase di

post-processing.

Comunque, al fine di gestire le problematiche connesse all'illuminazione ed alla corrispondenza cromatica in fase di acquisizione dati, è stato utilizzato un pannello di riferimento portatile per i colori, il cosiddetto *ColorChecker*¹³, grazie al quale è possibile misurare i valori colorimetrici minimizzando le differenze fra fotocamere e lenti, eseguire il bilanciamento del bianco, creare il profilo colore e calibrare le caratterizzazioni della fotocamera, oltre che riuscire a verificare l'esposizione della scena stessa. Di conseguenza, tutte le immagini digitali acquisite, importate in formato Raw¹⁴, sono state sviluppate in *Adobe Lightroom* utilizzando un apposito *plug-in* di controllo.

Allo stesso tempo è stata effettuata una selezione preventiva delle immagini migliori, scartando quelle che presentavano maggiori aree di sfocatura, particolarmente ostative per la fase di *matching* durante la procedura fotogrammetrica 3D. Ciò appare inoltre rilevante ai fini della qualità della *texture* fotografica da restituire, sia per soluzione che per stabilità dei valori cromatici e tonali in questa ottenuti, ed in relazione ad una prima divisione delle immagini in

blocchi, eseguita in base a criteri coerenti con il flusso di lavoro del *software* SfM impiegato.

Infatti, vista l'articolazione del *set* di immagini acquisite, si è scelto di effettuare due operazioni preliminari al loro stesso caricamento nel programma fotogrammetrico: (1) la definizione dei vari blocchi fotogrammetrici secondo la maggiore analogia delle caratteristiche di esposizione¹⁵ e di sfondo delle immagini, in ciascuna delle quali fossero ben visibili almeno tre *targets* di riferimento corrispondenti; (2) la creazione di una maschera di livello¹⁶ per ogni fotogramma attraverso cui indicare le aree che potevano essere fonte di confusione computazionale e portare, quindi,



Fig. 82 – (nella pagina precedente) Schema 3D della strategia di imaging adottata. Il progetto delle posizioni in cui scattare le foto è stato determinato al fine di una copertura totale della Stele, in modo tale che questa venisse ripresa da ciascun lato senza lasciare lacune. La fase di acquisizione è stata eseguita agevolando il riconoscimento di almeno tre *targets* omologhi fra un'immagine e quella seguente. Per una restituzione di qualità, comunque, maggiore è il numero dei punti corrispondenti individuati migliore sarà l'output 3D ricostruito. Considerando che le distorsioni maggiori dei fotogrammi si presentano in prossimità dei bordi, si è cercato di mantenere la Stele al centro dell'immagine affinché i punti corrispondenti rientrassero nell'area maggiormente 'affidabile' per la *feature detection*.

Fig. 83 – (a destra) Foto della Stele con il posizionamento del *ColorChecker Passport*. Tale versione portatile, analogamente al formato classico più grande (quanto un foglio A4), mantiene 24 patch colore, ciascuna delle quali riflette la luce proprio come il corrispondente colore nella realtà, garantendo quindi una maggiore flessibilità per regolare le immagini in base alla modalità di acquisizione del colore della specifica fotocamera in determinate condizioni di illuminazione.

a risultati di non corretta ricostruzione. Entrambe le scelte sono state indirizzate verso l'ottimizzazione non solo della stima per l'orientamento della fotocamera, del riconoscimento dei punti omologhi e del loro accoppiamento, ma anche per gli stessi tempi di calcolo, agevolando il *processing* computazionale eseguito dal *software*, migliorandone perciò l'esito restituito.

Per quanto concerne la seconda operazione, nello specifico, il vantaggio ottenuto attraverso l'applicazione di aree mascherate da poter escludere nelle varie fasi di restituzione – dato che la Stele è stata più volte spostata nella scena, durante l'acquisizione delle immagini – si è dimostrato particolarmente significativo¹⁷.

La possibilità di non prendere in considerazione eventuali disturbi o variazioni nello sfondo dei fotogrammi durante il rilevamento delle *features* (quindi nella stima delle relative posizioni della fotocamera), oppure nel corso della costruzione della nuvola di punti densa, al fine di ridurre la complessità risultante nel processo di calcolo per le mappe di profondità, ha consentito di aumentare la precisione e la qualità di ricostruzione della geometria. Del resto l'ap-

plicazione di maschere precise sui fotogrammi ha altresì comportato il 'ri-disegnare' – attraverso appositi strumenti di *photo editing*¹⁸ – il profilo della Stele mostrato, mantenendo però inalterate le immagini originali.

Generalmente in quest'ultime, insieme alla Stele, vi sono alcune aree di sfondo che, qualora non presentino difformità fra loro, possono essere comunque utili ai fini di un posizionamento maggiormente preciso della fotocamera e, quindi, sfruttabili per lo stesso allineamento delle foto. Al contrario l'impatto di tali aree nella costruzione della nuvola di punti densa ne costituisce un forte limite, poiché se il modello ottenuto contiene la Stele e lo sfondo, le geometrie di quest'ultimo 'consumano' una parte dei poligoni della *mesh* successiva, che potrebbero essere altrimenti adoperati per modellare – esclusivamente – l'importante monumento etrusco.

Una volta caricati i vari blocchi, seguendo l'iter del *processing* fotogrammetrico in modo quasi del tutto automatico¹⁹, è possibile ottenere una *range map* densa 'colorata' e ad alta risoluzione, sia da un punto di vista quantitativo (per l'elevato numero di punti) che per qualità metrica re-



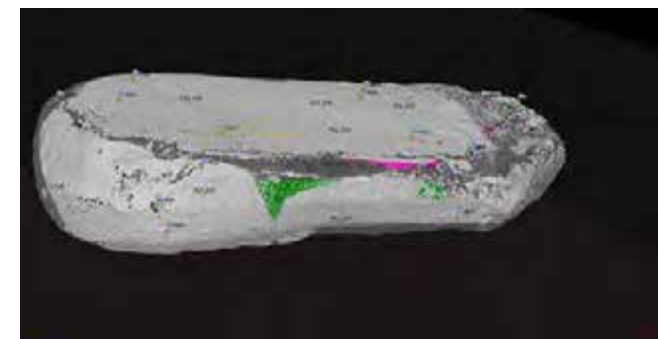
stituita (precisione). Peraltro, il dimensionamento di questo modello, ovvero la sua messa in scala rispetto al reale, non può prescindere dal rilievo diretto eseguito sulla Stele – in fase di progetto – per registrare le posizioni dei 17 *targets* di riferimento; cosicché quanto maggiore sarà stata la precisione nella loro misura tanto minore risulta l'errore ottenuto.

Ricostruita così la Stele attraverso una nuvola di circa 610 milioni di punti e con una stima di errore sub-millimetrica (0,621 mm) diventa già ammissibile archiviare lo stato di fatto del monumento precedentemente al suo restauro, poiché in virtù degli stessi metodi di *point-based texturing* ne è già possibile una sua visualizzazione foto-realistica (vedi par. 3.5.6).

Il modello analitico restituito, seppure di elevate dimensioni, mantiene un'altissima fedeltà quanto alle caratteri-

Figg. 84, 85 – (sotto e nella pagina precedente) Screenshot da Agisoft Photoscan durante l'elaborazione della nuvola di punti ottenuta dalle immagini della Stele prima del restauro.

Figg. 86, 87 – (a destra) Viste da Agisoft Photoscan durante alcune fasi del *processing* fotogrammetrico pre-restauro.



stiche morfologiche del monumento – garantendo una precisione inferiore al millimetro – che alla rappresentazione del suo aspetto reale attraverso il colore assegnato ad ogni punto. Perciò modello che, opportunamente archiviato e reso accessibile, può servire sia alla documentazione ed dello *status quo* della Stele, così come questa è stata ritrovata, sia per lo studio da parte della comunità scientifica.

Durante la fase di restauro sulla superficie della Stele sono emerse alcune aree in cui il materiale lapideo presentava leggere alterazioni cromatiche, tali da richiedere ulteriori analisi di verifica anche dal punto di vista geologico. Di conseguenza, grazie al personale tecnico specializzato del Centro di Restauro della Soprintendenza Archeologia della Toscana²⁰, sono stati condotti specifici *test* sul monumento, il cui esito ha permesso di acquisire rilevanti informazioni anche in relazione al suo stato di conservazione.

‘La stele è stata realizzata da un blocco di arenaria macigno, roccia che costituisce gran parte dell’ossatura dell’Appennino centro-settentrionale. Il blocco si presenta modellato con un allungamento parallelo alle superfici di strato e con una superficie interessata da incisioni antiche entro le quali non è stata trovata traccia di colore. La superficie dell’arenaria presenta una colorazione marrone-scuro anomala

per un blocco arenaceo rimasto interrato per un così lungo tempo. Questo potrebbe far pensare ad una ossidazione delle componenti ferrose riconducibile all’esposizione della pietra al calore anche se attualmente non ci sono indizi significativi che lo confermano. Sulla superficie arrossata si trovano tracce discontinue di colore nero aderenti al substrato le cui analisi hanno identificato negli ossidi di ferro e di manganese le componenti principali. Oltre a queste componenti sono presenti particelle terrose dovute al contatto con il terreno di giacitura. La superficie della pietra si presenta corrosa e scabra per il maggior degrado della matrice che ha messo in evidenza la componente detritica più grossolana. In alcune parti si osservano abrasioni moderne forse riconducibili al suo ritrovamento’.

6.3 Costruzione del modello 3D della stele dopo il restauro

Lo strumento utilizzato per il rilievo 3D della Stele, una volta terminata la sua ripulitura, è stato un braccio di misura portatile con rilevatore laser o ‘probe a contatto’, ovvero un sistema a sensori misti che integra uno scanner



a triangolazione con un braccio articolato (CMM) a sette assi, tra loro solidali e movimentabili manualmente²¹.

La grande flessibilità dello strumento portatile scelto, ha permesso di eseguire agevolmente le operazioni di rilievo della Stele, attraverso la semplice traslazione manuale della lama dello scanner laser a triangolazione (‘Nikon ModelMaker MMDx100’)²², testa di scansione del braccio articolato (‘Nikon MCAx25+’)²³.

Attraverso l’emissione di un insieme di punti luminosi

Fig. 88 – (nella pagina precedente) Foto della Stele durante una fase intermedia del restauro conservativo.

Fig. 89 – (sotto) Foto della fase di acquisizione con il sensore range a triangolazione.



allineati, costituenti un denso segmento laser di 10 cm, la tecnologia di questa camera digitale offre, infatti, una precisione di misura fino a 10 micron (μm), godendo di una risoluzione reale (non interpolata) di oltre mille punti per ogni banda, tale da permettere di poter scansionare, in modo accurato ed efficiente, le caratteristiche geometriche e la superficie irregolare dell'eccezionale 'monumento etrusco'. Lo scanner laser a triangolazione, infatti, misurando la deformazione della lama laser riflessa determina la posizione spaziale dei punti sulla superficie illuminata della Stele. Anche in tale caso, la progettazione della campagna di rilievo dell'oggetto ha dovuto tenere conto delle manovre che esso doveva subire per essere totalmente scansionato e, perciò, degli spostamenti che la strumentazione doveva necessariamente prevedere. In relazione alle dimensioni ed alla forma pseudo-trapezoidale del manufatto, considerando che la direzione più comoda con cui effettuare l'acquisizione laser – le cosiddette 'strisciate' – è risultata quella trasversale, sono state previste 4 differenti postazioni per le operazioni di scansione, rispettivamente 2 per entrambi i lati. D'altronde, ai fini di una copertura completa della sua superficie, il capovolgimento della Stele ha determinato *de facto* il raddoppiamento del numero di spostamenti per la strumentazione e, di conseguenza, degli allineamenti da calcolare successivamente nella fase di post-produzione. Considerando quindi il *range* operativo del braccio articolato impiegato, le cui caratteristiche correlate permettono di descrivere correttamente la forma dell'oggetto ed automatizzare il processo di scansione, ed in relazione al fatto che lo scanner laser a triangolazione assicura comunque – per le sue caratteristiche funzionali – la referenziazione del dato acquisito in base alla sua stessa posizione²⁹, in fase di acquisizione non è risultato necessario prevedere una percentuale di sovrapposizione fra le numerose passate laser da effettuarsi. Nonostante ciò, ad ulteriore garanzia, si è mantenuto costantemente un'area di *overlay* tra strisciate contigue, evitando di lasciare

Fig. 90 – (a sinistra) Pipeline della documentazione per la fase di elaborazione.

Fig. 91 – (nella pagina a fianco) Specifiche della strumentazione laser triangolazione adoperata per il rilievo della Stele una volta ripulita dal residuo terroso.



SPECIFICHE DELLA STRUMENTAZIONE LASER

braccio articolato MCAx25+		sensore laser MMDx100	
Portata <i>measuring range</i>	2,5 m	Larghezza fascio laser <i>stripe width (Y)</i>	100 mm
Ripetibilità sul singolo punto ²¹ <i>point repeatability</i>	0,027 mm	Stand-off ²³ <i>stand-off (to near Field Of View)</i>	100 mm
Accuratezza volumetrica ²² <i>volumetric accuracy</i>	± 0.038 mm	Portata <i>measuring range (Z)</i>	100 mm
Peso <i>weight</i>	8,5 kg	Precisione (1σ) ²⁴ <i>accuracy</i>	10 μm
Temperatura di esercizio <i>working temperature</i>	0 - 50°C	Velocità di trasmissione nel FOV <i>data rate at full Field of View</i>	50 Hz
Temperatura di immagazzinamento <i>storage temperature</i>	- 30 - 70°C	Velocità di trasmissione massima <i>max. data rate</i>	150 Hz
Umidità relativa <i>relative humidity</i>	10 - 90% non condensante	Punti per fascio laser <i>points per stripe</i>	1000
Altitudine operativa <i>operational elevation</i>	0 - 2000 m	Compensazione della temperatura <i>temperature compensation</i>	Sì
Conformità CE <i>CE compliance</i>	Sì	Controllo intensità laser <i>laser power control</i>	Automatico per punto
Tensione di alimentazione universale <i>universal worldwide voltage</i>	110 - 240 V AC 50 - 60 Hz	Peso del sensore <i>sensor weight</i>	400 g (+/- 20)
		Intensità laser <i>laser power</i>	Classe 2

braccio articolato MCAx25+ con sensore laser MMDx100

Precisione (2σ) ²⁵ <i>accuracy</i>	54 μm
---	------------------

La precisione del sistema di *laser scanning* indica la *performance* della *range camera* combinata con il localizzatore portatile. Il *test* è eseguito mediante la scansione estremamente precisa di una piastra di riferimento nei cinque orientamenti diversi del braccio articolato e dello scanner laser.

La precisione del sistema di scansione laser indica la *performance* dello scanner laser combinato con un localizzatore portatile. La prova viene eseguita mediante una scansione estremamente precisa di una piastra di riferimento nei 5 diversi orientamenti del braccio articolato dello scanner laser. Così le cinque nuvole di punti ottenute vengono fuse insieme in un'unica nuvola di punti, attraverso la quale viene poi costruito un piano di miglior adattamento (*best-fit plane*). Per ciascuno dei punti di tale *range map*, viene calcolata la distanza rispetto al piano *best-fit*. Il parametro assunto quale rappresentativo è il doppio dello scarto quadratico medio.

porzioni di superficie non scansionate e, quindi, mancanti. A maggior ragione, grazie al *software* associato allo strumento laser, è stato eseguito il monitoraggio in *real time* delle nuvole di punti acquisite per ogni strisciata³⁰, verificandone di volta in volta la posizione, l'orientamento e le caratteristiche geometriche corrispondenti.

Una volta terminata la fase di acquisizione ed ottenuti, perciò, quattro blocchi di scansione – composti rispettivamente da una serie di singole scansioni in sequenza (molteplici strisciate di punti) acquisite da ciascuna delle quattro posizioni dello scanner – per le prime fasi di elaborazione dei dati è stato impiegato il *software Geomagic Wrap*³¹. Durante la fase di processamento dei dati, innanzitutto, è occorsa un'oculata pulizia delle singole scansioni (*trimming*) rimuovendo quelle che risultavano molto parziali. In tal caso, il filtraggio dei dati grezzi è stato finalizzato al mantenimento solo di quelli maggiormente validi fra la totalità prodotta automaticamente dallo strumento. Dopodiché è stata effettuata un'ottimizzazione dell'allineamento fra le singole strisciate di punti, contenute in ognuno dei blocchi, in modo da garantire una maggiore congruenza topologica dei dati e, quindi, una loro descrizione continua. Per ogni blocco è stata, perciò, eseguita la registrazione globale fra le strisciate di punti contenute, mediante rototraslazioni rigide. In relazione alla precisione metrica ottenuta dalla convergenza di registrazione il valore numerico considerato è rappresentato dalla distanza media residua fra punti; tale parametro statistico è infatti l'indice fornito dal *software* attraverso cui poter valutare gli esiti dell'allineamento effettuato, tenendo conto, comunque, dei rispettivi valori di varianza, ovvero della cosiddetta deviazione *standard*. Di seguito si è proceduto alla registrazione dei quattro blocchi di scansione fra loro, prima attraverso un pre-allineamento manuale fra coppie con l'individuazione di alcuni punti omologhi – per individuare la soluzione di partenza – poi tramite gli algoritmi ICP di registrazione globale.

Al fine infatti di ottimizzare l'allineamento fra le singole scansioni in un unico sistema di riferimento, piuttosto che eseguire una sola trasformazione rigida fra gruppi di *range maps*, è stato ritenuto opportuno spostare tutte le scansioni nel medesimo gruppo, ovviamente solo dopo un iniziale allineamento manuale. Così dopo aver riunito tutte le scansioni già ottimizzate in unico sistema di riferimento, e

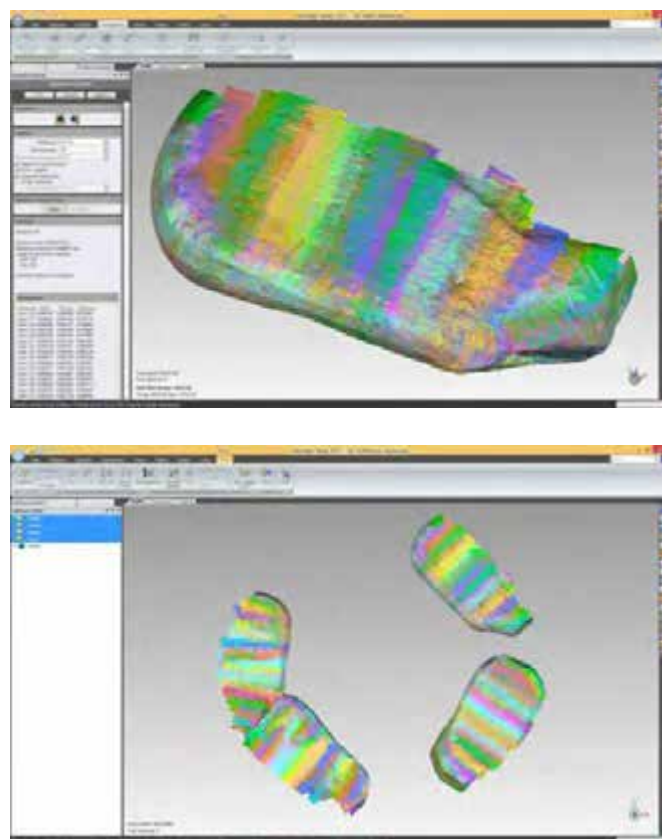
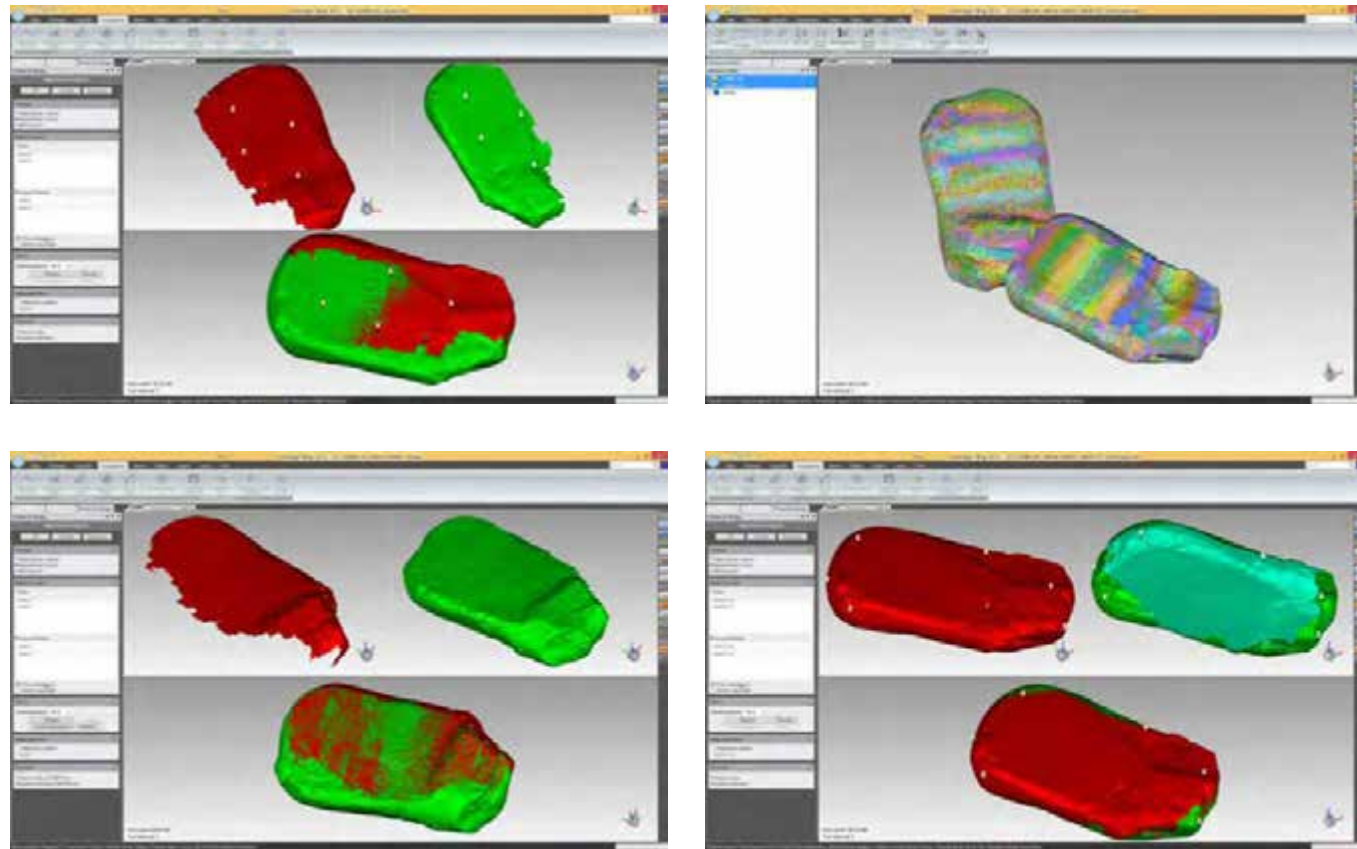


Fig. 92 – (sopra) Screenshot della prima fase di elaborazione di uno dei quattro blocchi di scansione eseguita su Geomagic Wrap. Dopo la pulizia di tutte le strisciate di punti e la rimozione di quelle molto parziali – fino ad ottenere un modello di 62.423.140 punti – è stata eseguita una registrazione globale per raggiungere, con un certo numero di iterazioni (20 in tale caso), la convergenza ottimale fra le 89 strisciate acquisite. Dal report del primo allineamento è possibile valutare la distanza media fra punti ottenuta (pari a 0,094 mm) ed il valore di deviazione standard (0,086 mm). Per tutti i quattro blocchi gli esiti di questa prima fase di ottimizzazione sono dell'ordine del decimo di mm.

Fig. 93 – (sotto) Screenshot della fase di allineamento fra blocchi di scansione. Se una volta importati i quattro blocchi, ciascuno con le scansioni ottimizzate e separate, questi fossero stati mantenuti in gruppi distinti, l'ottimizzazione dell'allineamento (Registrazione Globale) avrebbe computato solo una trasformazione fra gruppi senza ottimizzare le singole scansioni.

Fig. 94 – (sotto) Foto della fase di acquisizione con il sensore range a triangolazione.





ripetuto un ultimo allineamento, è stata ottenuta una nuvola di punti finale di oltre 184 milioni di punti. Unite quindi tutte le scansioni in un'unica *range map*, è divenuto possibile considerare le caratteristiche del modello dei dati acquisiti, una volta che questo è stato ottimizzato: le analisi dei parametri statistici finali di registrazione dimostrano come le elaborazioni fatte sui dati grezzi abbiano mantenuto lo stesso *range* dei valori iniziali, pari al decimo di millimetro. Tuttavia la presenza di punti aventi una distanza inferiore allo stesso errore residuo, stimato dall'indicatore di allineamento, ha richiesto un'operazione di decimazione. Tale passaggio, finalizzato ad eliminare solo la ridondanza di dati, ha considerato un campionamento di punti con un valore di spaziatura doppio rispetto al residuo di acquisizione. A questo punto la gestione della *range map* e delle ulteriori operazioni di decimazione eseguibili, hanno variato la consistenza del modello di punti

Fig. 95, 96 – (in alto a sinistra) La fase di pre-allineamento fra le varie nuvole di punti ottimizzate è stata eseguita manualmente, per entrambe le coppie di gruppi di scansione – appartenenti rispettivamente ai quattro blocchi – attraverso il riconoscimento di punti omologhi.

Fig. 97, 98 – (in alto a destra) Ottenute due nuvole di punti ottimizzate, ma comunque riferite a due sistemi di riferimento differenti, queste sono state raggruppate assieme eseguendo di nuovo le operazioni di allineamento in modo semi-automatico (pre-allineamento manuale e registrazione globale).

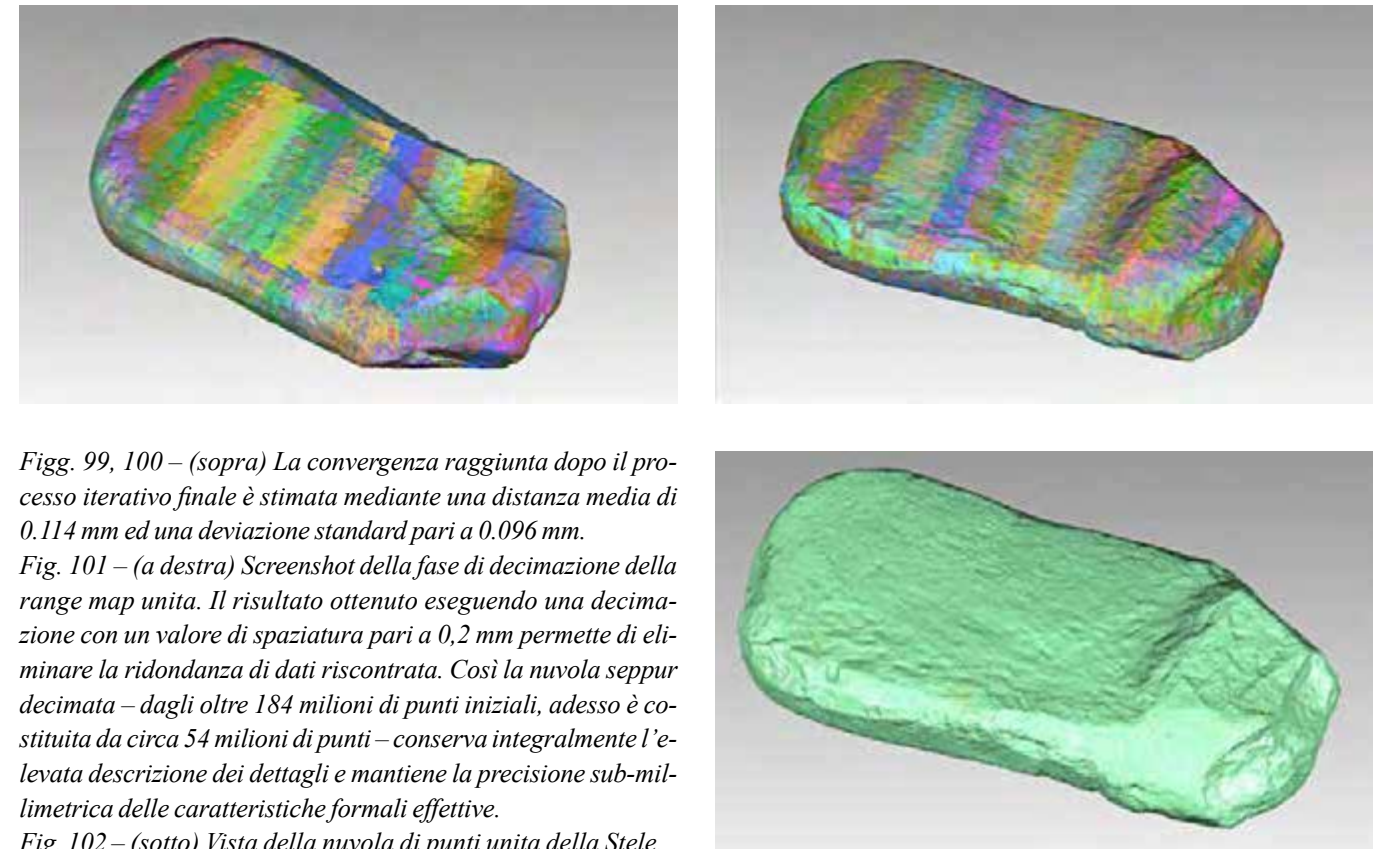


Fig. 99, 100 – (sopra) La convergenza raggiunta dopo il processo iterativo finale è stimata mediante una distanza media di 0.114 mm ed una deviazione standard pari a 0.096 mm.

Fig. 101 – (a destra) Screenshot della fase di decimazione della range map unita. Il risultato ottenuto eseguendo una decimazione con un valore di spaziatura pari a 0,2 mm permette di eliminare la ridondanza di dati riscontrata. Così la nuvola seppur decimata – dagli oltre 184 milioni di punti iniziali, adesso è costituita da circa 54 milioni di punti – conserva integralmente l'elevata descrizione dei dettagli e mantiene la precisione sub-millimetrica delle caratteristiche formali effettive.

Fig. 102 – (sotto) Vista della nuvola di punti unita della Stele.



da triangolare in *mesh*, a seconda delle due differenti esigenze di *output* finale.

Da una parte, infatti, si è mantenuto la nuvola di punti ad alta risoluzione, senza sottoporla ad alcun grado di decimazione se non quello finalizzato ad eliminarne la ridondanza; dall'altra - considerando l'elevato numero di punti - si è proceduto, invece, ad ottenere un modello maggiormente maneggevole³² che tenesse comunque conto della complessità morfologica dell'oggetto. Ciò è stato possibile poiché le scansioni acquisite con l'avanzato scanner laser a triangolazione hanno fornito un'abbondante densità di misurazioni e, quindi, anche l'applicazione di una deci-

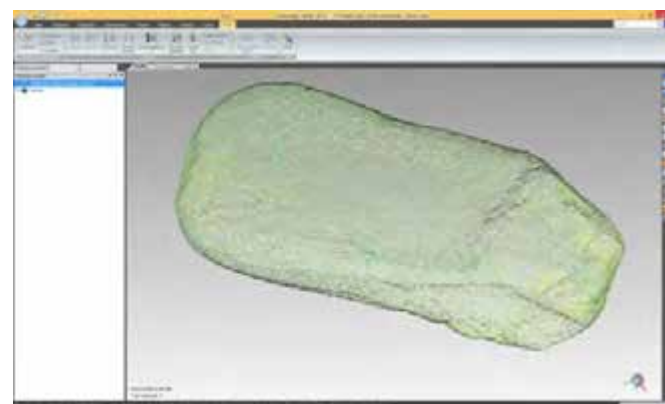
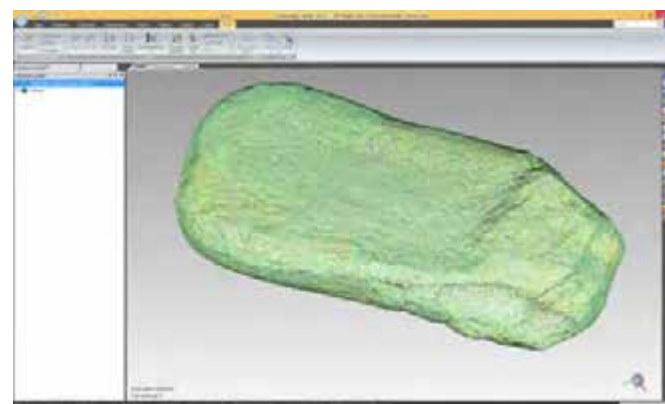


Fig. 103 – (a sinistra) Rappresentazione su lastra olografica della Stele di Vicchio utilizzando il modello 3D ottenuto. Tale esposizione virtuale ha fatto parte della mostra 'Scrittura e culto a Poggio Colla: un santuario etrusco nel Mugello' che ha avuto luogo dal 2 settembre al 31 dicembre 2016 nell'ambito delle Celebrazioni Etrusche promosse dal Consiglio Regionale della Toscana, Soprintendenza ABAP per la Città Metropolitana di Firenze e le Province di Prato e Pistoia e l'MVAP.

Fig. 104, 105 – (sopra) Screenshots di esempi di decimazione con spaziatura rispettivamente a 0,4 e 0,6 mm, ottenendo range maps ridotte per numero di punti, con circa 14 milioni di punti nel primo caso e con nemmeno 5 milioni nel secondo. A questa fase, infatti, la gestione della range map e delle ulteriori operazioni di decimazione eseguibili - qualora esse siano richieste da specifici requisiti di output finale - possono variare la consistenza del modello di punti da triangolare in mesh, in virtù di una sua divulgazione (mostre virtuali, olografia, siti internet, promozione, etc.).

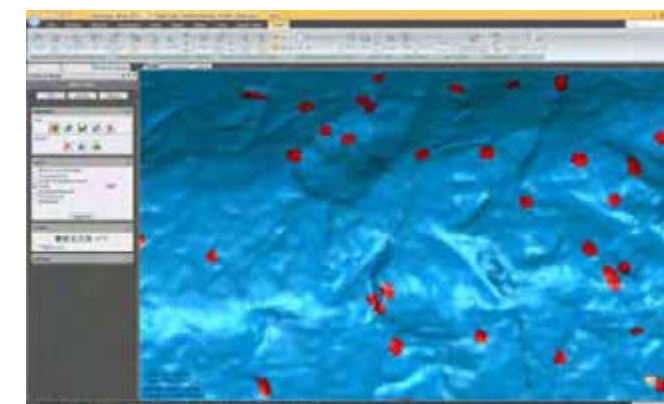
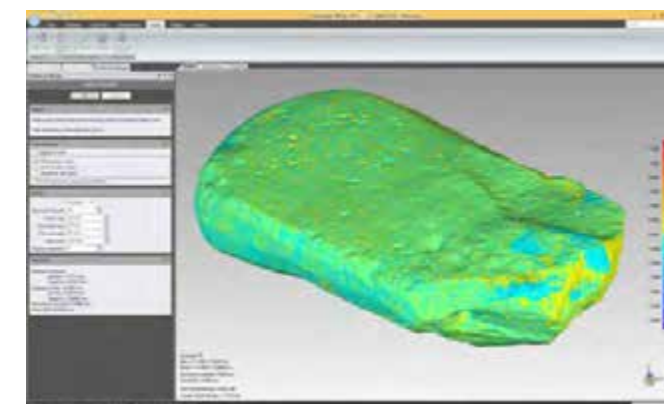
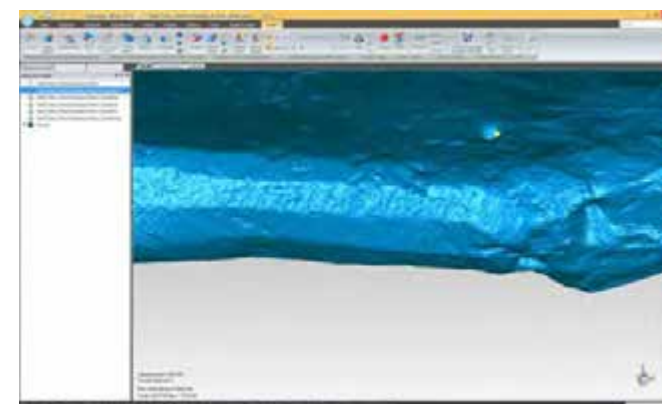
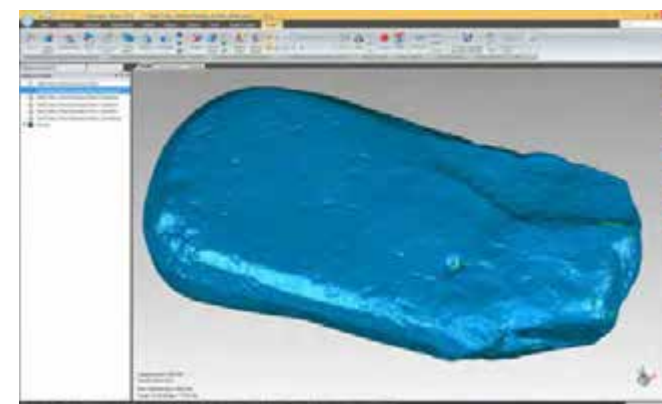


Fig. 106, 107 – (sopra) Screenshot della fase di meshing e verifica dei risultati. Partendo dalla solita range map (quella di quasi 5 milioni di punti) la triangolazione della superficie è stata eseguita con gradi di riduzione del rumore differenti (minimo, medio, massimo ed automatico).

Fig. 108 – (a destra in alto) Valutazione della corrispondenza fra i modelli mesh generati e la nuvola di punti, si è notato come le differenze più evidenti, ovvero le maggiori distanze dal modello di partenza - contenute comunque in un range di +/- 0.5 mm - siano rilevabili solo localmente.

Fig. 109 – (a destra in basso) Screenshot della fase finale di editing del modello mesh. Sono stati chiusi alcuni piccoli fori ed eliminate minime incoerenze topologiche (punte) affinché il modello finale fosse watertight.

mazione sostanziale non ha ridotto la capacità descrittiva dei dettagli del modello corrispondente³³.

Sono state dunque ricavate due *range maps*: la prima con una risoluzione 'integrale' è stata finalizzata allo studio delle iscrizioni di difficile lettura e, quindi, alla ricerca da parte della comunità scientifica; la seconda è stata, invece, elaborata quale modello destinato alla visualizzazione ed interazione nel museo virtuale attraverso la sua stampa su una lastra olografica³⁴.

In quest'ultimo caso, perciò, si è scelto di decimare la nuvola di punti con un campionamento a 0,6 mm (Fig. 105), ottenendo un modello adatto ad attraversare i successivi step di elaborazione fino a divenire compiutamente integrato nella geometria.

Il modello può essere infatti parzialmente semplificato, riducendo il numero di punti, nel caso in cui i dati di partenza abbiano una risoluzione troppo alta. È possibile dunque ri-

durre, già in questa fase, la risoluzione della *range map* affinché il risultato ottenuto, una volta trasformato in *mesh*, possa essere utilizzato in applicazioni di museo virtuale, in una coerente leggibilità delle forme del reperto. La generazione del modello *mesh* e la successiva fase di *editing* sono state eseguite in modo quasi del tutto automatico per entrambi i casi.

Infatti, una volta riorganizzata la descrizione poligonale delle superfici, nonostante il differenziale di triangoli ricavato dai due distinti campionamenti, sono emerse comunque alcune piccole imperfezioni da correggere³⁵.

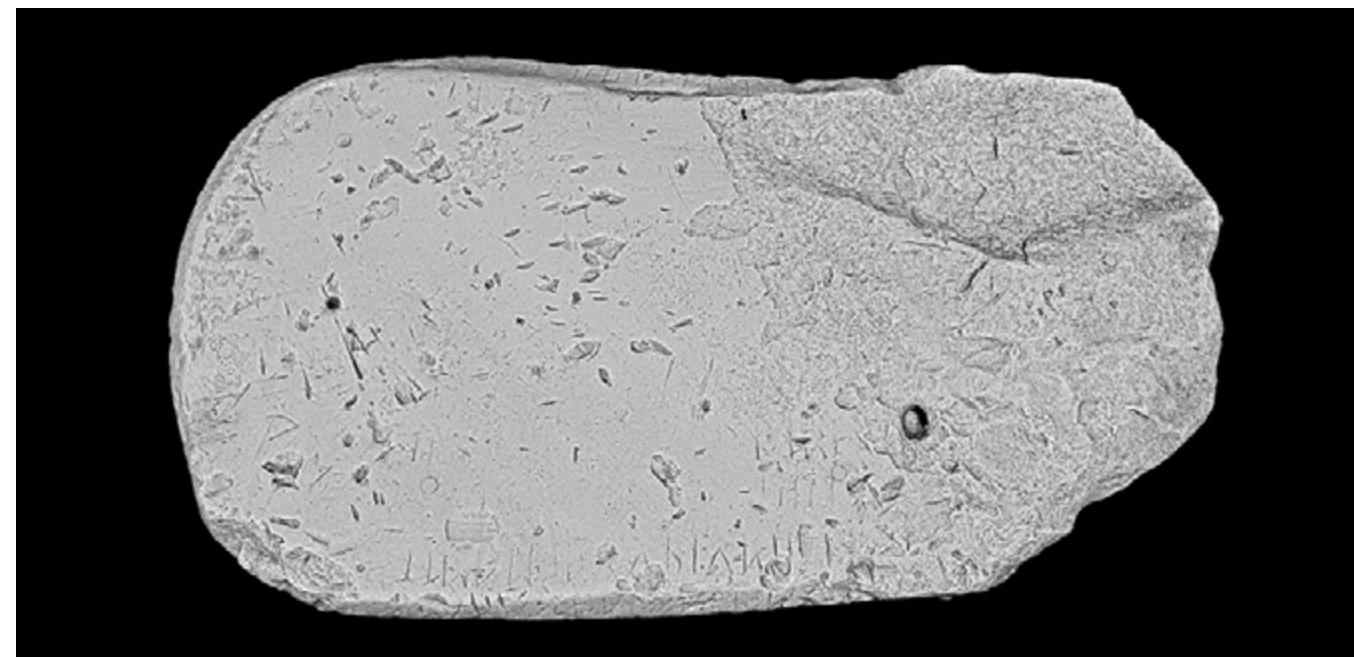
Per la fase di *meshing* del modello con risoluzione inferiore, sono state inoltre testate molteplici modalità di campionamento – mantenendo tuttavia un numero massimo di triangoli non superiore ai 9 milioni – attraverso cui ricavare modelli triangolati con una riduzione del rumore (*noise*) o senza. La soluzione automatica, in particolare, ha fornito esiti migliori dal punto di vista sia morfologico che per l'accuratezza di ricostruzione della superficie. Così,

una volta corrette le minime lacune ed incoerenze superficiali emerse, si è ottenuto un modello di nove milioni di triangoli *watertight*, pronto dunque per il salvataggio nel formato (OBJ³⁶) richiesto per la stampa olografica.

6.4 Verifica e analisi dei risultati: la lettura delle iscrizioni

Dopo aver trasformato il modello di punti ad alta risoluzione in un modello poligonale che mantenesse la precisione geometrica e le caratteristiche morfologiche acquisite con lo scanner laser a triangolazione, ed aver attentamente corretto le imperfezioni rilevate nella superficie triangolata, l'esportazione in *software* avanzati di *mesh processing*³⁷ o di *editing 3D*³⁸ ha consentito una completa esplorazione e visualizzazione della Stele.

L'elevato numero di *mesh* (quasi 29 milioni di triangoli) di cui è costituita la superficie del modello permette, infatti, di



Figg. 110, 111, 112, 113 – (nella pagina precedente e sopra) Screenshots del modello *mesh* della Stele ad alta risoluzione con effetti simulativi di *shading* grazie ai quali simulare i parametri di illuminazione sul modello e leggere le iscrizioni di esiguo spessore.

apprezzare e misurare le peculiari caratteristiche morfologiche del monumento. L'ulteriore applicazione di tecniche di *rendering* o di ombreggiatura (*shading*)³⁹, attraverso cui è possibile simulare e variare i parametri di illuminazione sul modello della Stele, ha agevolato l'individuazione del testo inciso migliorandone in tale modo l'aspetto visivo. Le epigrafi iscritte con uno spessore sub-millimetrico sono divenute dunque decifrabili direttamente sulla copia 3D del monumento.

A questo punto, la migliore verifica degli intenti dello stesso *management* del progetto documentativo, supportato dalle notevoli performance dello scanner 3D a triangola-

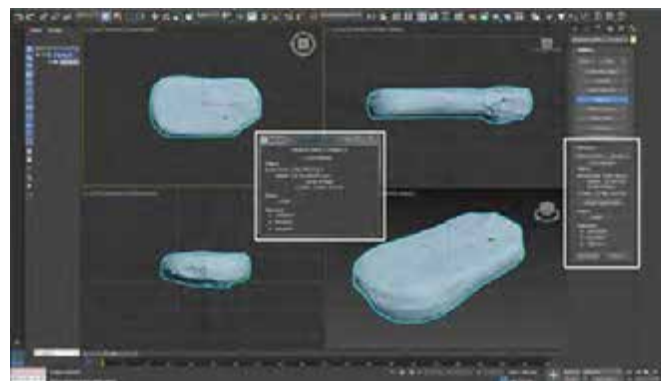
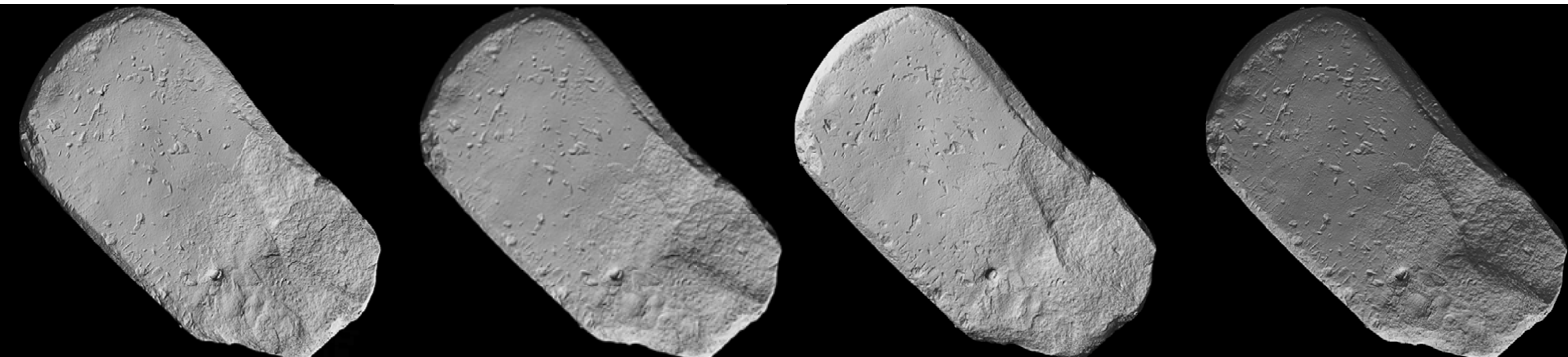
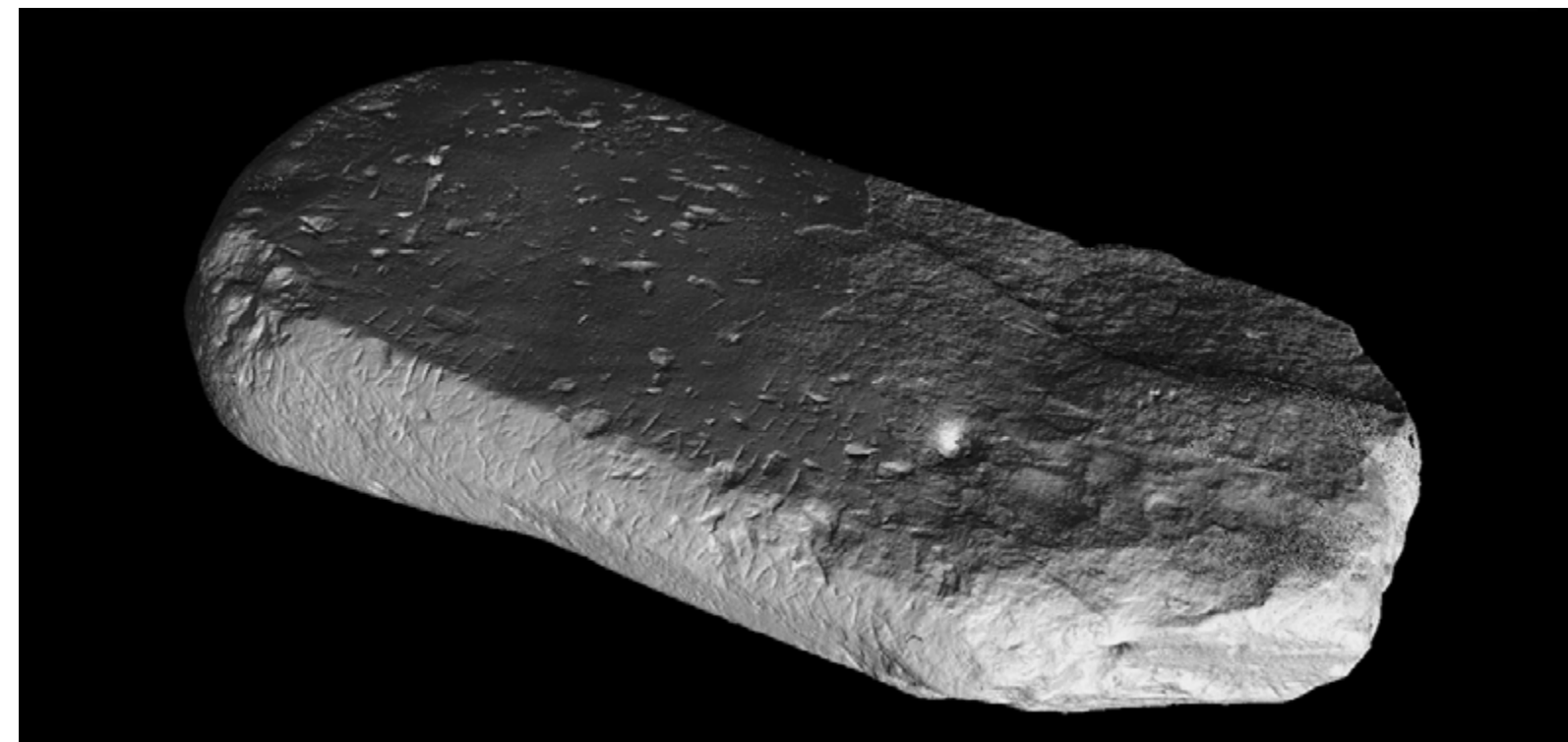
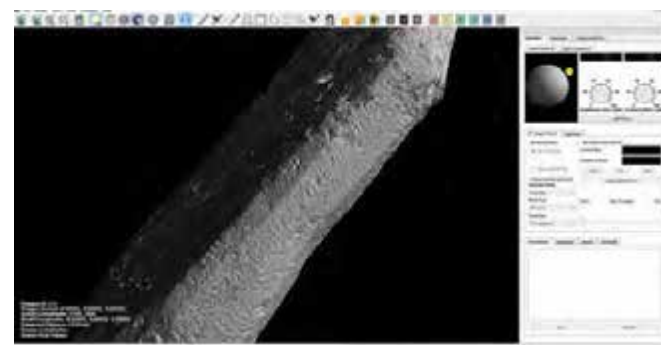


Fig. 114 – (a sinistra) Dall'impiego del modello 3D in software di editing 3D è stato possibile ricavare l'esatto dimensionamento del monumento, con le seguenti misure massime: una lunghezza di 1.2 m (1.195), una larghezza di 0.65 m (0.6508), uno spessore di 0.26 m (0.2586). Stabilito inoltre un volume pari a circa 0,115 metri cubi, il suo peso corrisponde approssimativamente a 250 kg⁴¹.

Figg. da 115 a 121 – Screenshots di varie viste del modello nella piattaforma di CHER-Ob, software sviluppato dal Computer Graphics Group della Yale University (USA), dove è possibile controllare e orientare la luce sulla superficie del modello.



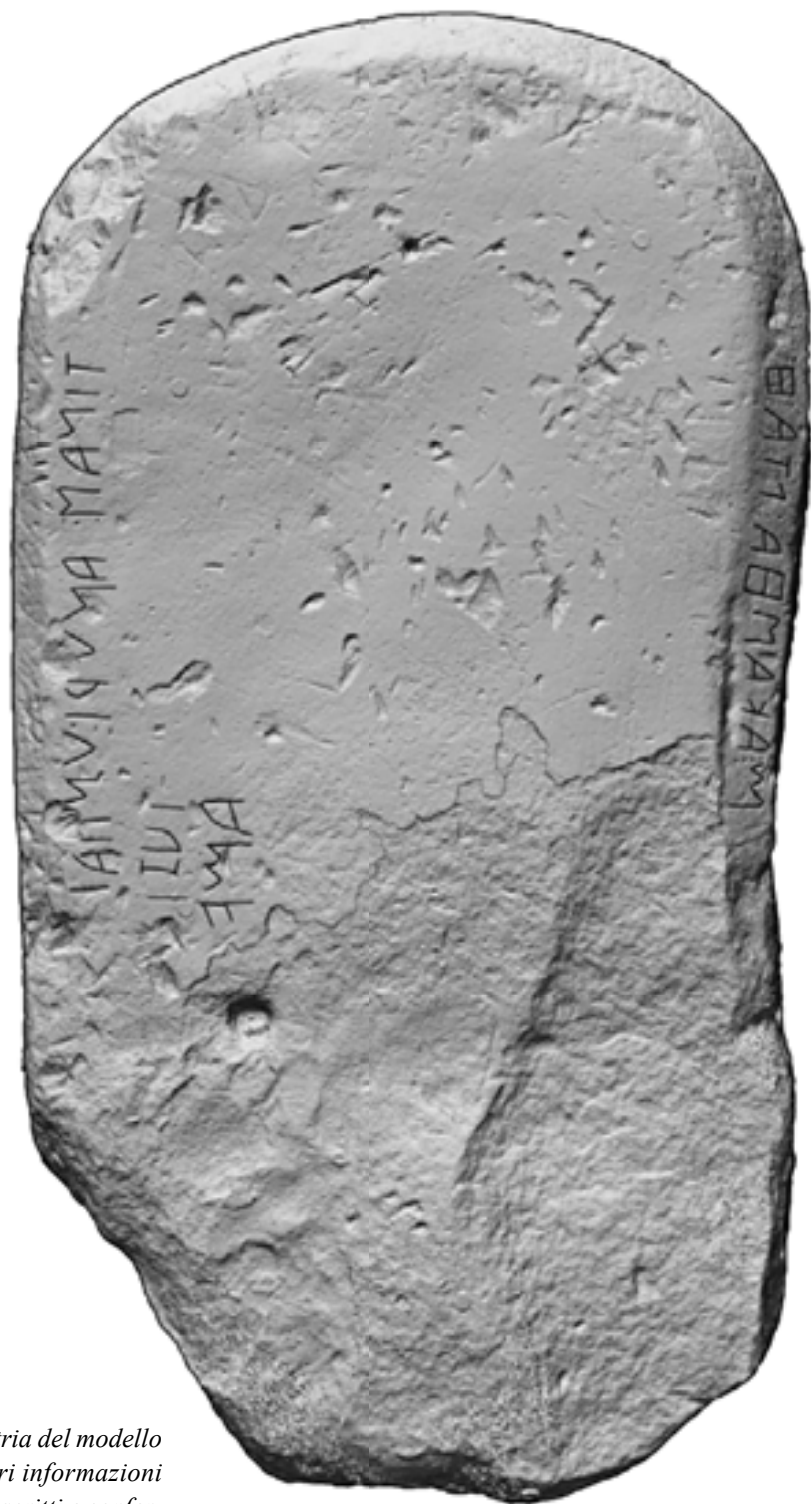


Fig. 122 – Dalla geometria del modello 3D si ricavano maggiori informazioni per riconoscere i segni iscritti e confermare le ipotesi interpretative.

zione e dalle rigorose procedure di elaborazione dei dati acquisiti, si è svolta tramite la visualizzazione e l'esplorazione in una piattaforma sperimentale virtuale del modello 3D⁴⁰, dove è stato possibile regolare con facilità la direzione della luce incidente la sua superficie. Ciò dimostra l'elevato valore intrinseco di questo tipo di rappresentazione; infatti è la geometria stessa, ricostruita nella sua terza dimensione, a fornire le risposte agli intenti della ricerca.

La notevole qualità metrica e geometrica del tipo di *output* ricostruito, nonostante sia privo di dettaglio cromatico, costituisce dunque la fonte principale d'ispezione e di studio per l'avanzamento della ricerca, consentendo di esplorare in modo affidabile ed in tempo reale la Stele.

Se da un lato infatti la fotografia con luce obliqua si è confermata quale tecnica non invasiva, comoda ed economica per il rilievo delle epigrafi, enfatizzandone il dettaglio grafico dei caratteri incisi, di fronte alla loro forma geometrica molto irregolare – nonché alle precarie condizioni superficiali del monumento ed al suo aspetto esteriore privo di contrasto cromatico – il rilievo incentrato sulla ricostruzione 3D geometrica rigorosa ha aperto a forme di visualizzazione dell'oggetto capaci di rafforzare l'interpretazione dei 'segni' altrimenti difficilmente riconoscibili.

In altri termini le attività di visualizzazione in ambiente virtuale, così come l'esplorazione del modello 3D ad alta risoluzione, si dimostrano opportunità attraverso le quali gli studiosi possono non solo formulare ipotesi sui segni iscritti ma, ruotando *ad libitum* il modello del monumento ed orientando la luce sulla sua superficie ricostruita, riescono a verificarne gli esiti e ad ottenere i riscontri necessari ai fini interpretativi. Infine la possibilità d'indagare in maniera precisa le geometrie del modello digitale, definendone le forme, le regole compositive, le caratteristiche ed i rapporti che intercorrono con la matrice formale ideale, permette di porre in essere valutazioni sugli aspetti quantitativi e qualitativi del reperto analizzato.

Note

1. Cfr. P.G. Warden, *Una scoperta recente: la stele iscritta del santuario etrusco di Poggio Colla (Vicchio)*, in P. Perazzi, G. Poggesi G., S. Sarti (a cura di), 'L'ombra degli Etruschi: simboli di un popolo fra pianura e collina', ed. Nuova Immagine Siena, 2016, Prato, pp. 83-85.

2. G. Bitelli, V.A. Girelli, F. Remondino, L. Vittuari, *The potential of 3D Techniques for Cultural Heritage Object Documentation*, in J.A. Beraldin, F. Remondino, M.R. Shortis, 'Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 6491', Videometrics IX, 64910S, San Jose, CA (USA), 2007, pp. 10. Per altri contributi sull'argomento vedere A.I. Papadaki, P. Agrafiotis, A. Georgopoulou, S. Prignitz, *Accurate 3D scanning of damaged ancient Greek inscriptions for revealing weathered letters*, in 'The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences', vol. 40, 2015, p. 237-43; S. Hermon, V. Vassallo, L. Vico, E. Christophorou, G. Iannone, *A 3D and geometrical approach to epigraph research; the Soli (Cyprus) inscription as a case study*, in 'CAA 2015 International Conference, 43rd Computer Application and Quantitative Methods in Archaeology', Siena, 2015, p. 296; G. Bitelli, F. Girardi, V.A. Girelli, *Digital enhancement of the 3D scan of Suhi I's stele from Karkermish (Tab. VII-IX)*, in 'Orientalia', Pontificium Institutum Biblicum, vol. 83, 2014, pp. 154-161.

3. Cfr. A. Nocentini, Vicchio (Fi). *L'intervento di restauro della stele di Poggio Colla: primi rilievi per lo studio delle epigrafi*, in 'Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana', Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, vol. 11/2015, ed. All'insegna del Giglio, Firenze, 2016, pp.109-110.

4. Del resto l'arenaria di cui è costituita la stele si mostra quale tipo di pietra a grana fine e, perciò, facilmente vulnerabile.

5. ... in tal caso sia personale che legata alle condizioni di illuminazione corrente.

6. Del resto 'un pilastro del presunto e misterioso etrusco e, per così dire, interno ad esso, ne ha prosperato un altro: quello della lingua. La presunzione di avere, estraendone il testo, "premutato" tutto quanto l'oggetto avesse da dire lo ha escluso dai benefici che una curiosità sempre tesa reca inevitabilmente alla conoscenza di un documento: ivi compresa la consistenza oggettiva del testo stesso' (Cfr. AA.VV., *Scrivere Etrusco*, ed. Electa, Pe-

urgia, 1985, p. 13).

7. Cfr. S. Sarti, *Vicchio (Fi): il recupero di una stele etrusca iscritta*, in Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana, op. cit., p. 108.

8. Cfr. G. Bitelli, V.A. Girelli, F. Remondino, L. Vittuari, *The potential of 3D Techniques for Cultural Heritage Object Documentation*, op. cit., p. 10.

9. Strumento che è idoneo, quindi, per le specifiche strumentali assicurate dallo scanner laser a triangolazione, oltre che per l'accurata descrizione geometrica 3D della superficie, acquisibile tramite la scansione di una lama luminosa.

10. Stefano Sarri, tecnico del Centro fiorentino della Ex-Soprintendenza Archeologia della Toscana.

11. La scelta di tale obiettivo è dettata dal fatto che il *software* avanzato SfM impiegato, ai fini della stima della focale della fotocamera, considera le immagini non calibrate come corrispondenti a quelle scattate usando una lente pari a 35 mm con un sensore (APS-C) come quello utilizzato.

12. Il numero delle fotografie dipenderà essenzialmente dalla complessità della superficie: più questa è irregolare, maggiormente sarà necessario utilizzare un elevato numero di immagini per evitare zone d'ombra (Cfr. A. Bezzi, L. Bezzi, D. Benjamin, *Computer Vision e Structure From Motion*, op. cit., p. 107).

13. Il pannello, che in origine si chiamava *Color Rendition Chart* ed era prodotto dalla *Macbeth Company*, oggi porta il marchio *X-Rite* (Cfr. C.S. McCamy, H. Marcus, J.G. Davidson, *A Color Rendition Chart*, in 'Journal of Applied Photographic Engineering', vol. 11(3), 1976, pp. 95-99; <http://www.xrite.com/>).

14. Denominazione derivata dal termine inglese che rimanda al concetto di 'grezzo', 'non elaborato'; in questo ambito sta, infatti, ad indicare che l'immagine catturata dal sensore immagine CCD o CMOS della fotocamera digitale viene registrata nella sua forma originaria, numerica, cioè senza ulteriori elaborazioni o compressioni. Nei formati Raw sono registrati, quindi, i dati monocromatici grezzi indicanti l'informazione di intensità luminosa incidente sui singoli *photo-detector* R, G e B.

15. In tal senso si intende il quantitativo di luce che investe il sensore e, quindi, 'disegna' l'immagine digitale. L'esposizione di uno scatto dipende da tre parametri fondamentali – apertura del diaframma, tempo di otturazione e sensibilità ISO – la cui regolazione (possibile nelle fotocamere *reflex*) influisce, appunto, sul quantitativo di luce che arriva al sensore.

16. per 'mascherare' – appunto – un'area selezionata sulla quale andremo ad effettuare una correzione. In questo modo otterremo

una zona precisa dell'immagine corretta o modificata mantenendo però inalterata l'immagine originale.

17. Le maschere possono essere caricate nel *software* SfM durante più fasi del *processing* fotogrammetrico (allineamento delle foto, costruzione della nuvola densa, costruzione della *texture*, esportazione di ortofoto).

18. Nello specifico, è stato impiegato il *software Adobe Photoshop* per l'elaborazione delle maschere di livello delle immagini e per una loro eventuale correzione.

19. Ad eccezione della selezione per ciascuna delle quattro fasi di alcuni parametri specifici che, in generale, servono a scegliere le modalità di esecuzione, ad indicare il tipo di superficie da restituire, a definire infine la qualità di *output* desiderata.

20. Resoconto redatto da P. Pallecchi, funzionario geologo, Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la Città Metropolitana di Firenze e le Province di Pistoia e Prato.

21. La flessibilità di tale apparecchio è abbinata alla sua capacità di registrare le misure angolari in corrispondenza delle articolazioni del braccio, al fine di calcolare la posizione dello scanner a triangolazione oppure della punta del tastatore a contatto (ovvero del 'probe'). Soluzioni miste di questo tipo, che combinano con altri sistemi di acquisizione 3D uno scanner laser a triangolazione, sono finalizzate ad aumentare il campo applicativo e a migliorare le prestazioni di quest'ultimo, dunque a garantire un livello di qualità dei dati superiore a quello ottenibile dal singolo strumento.

22. È uno scanner laser digitale portatile, serie 'Nikon Metrology ModelMaker MMDx/MMCx Handheld scanners' (Cfr. <http://www.nikonmetrology.com>).

23. Tale braccio manuale a coordinate di misura (CMM) è sistema di misura portatile a 7 assi, serie 'Nikon Metrology MCAX Articulated arms' (Cfr. <http://www.nikonmetrology.com>).

24. Tale parametro è relativo alla ripetibilità del braccio di misura con tastatore a punta sferica e viene determinato attraverso il test di riferimento *Point Repeatability Test* (SPAT): i punti vengono misurati con direzioni di approccio multiple, si calcolano il punto medio e la deviazione di ogni punto rispetto al centro medio. Il risultato ottenuto è l'errore massimo diviso per due.

25. Il *test* di Precisione Volumetrica (*Volumetric Accuracy Test*) è il *test* maggiormente significativo per valutare la precisione di misura nel volume. Esso stima accuratamente le prestazioni dello strumento in applicazioni di misura pratiche. Difatti prima viene ripetuta molte volte la misura di un calibro noto e certificato in tutto il volume di lavoro, in posizioni e orientamenti

differenti, dopo sono confrontate le misure ottenute con quella effettiva. Il *test* di Precisione della lunghezza Volumetrica è più appropriato per determinare l'accuratezza dell'apparecchio e la sua ripetibilità. Il risultato è la deviazione massima della distanza di misura meno la lunghezza teorica del calibro. Le specifiche di prova (secondo sono rilevanti sia al centro del braccio 'MCAX' che alla sua estremità dove è montata la sonda. Le specifiche sono raggiunte in condizioni ambientali stabili con il braccio articolato montato su una piastra o su una base magnetica e usando uno stilo con sfera d'acciaio avente diametro di 15 mm, lunghezza di 50 mm, e collegato ad entrambe le porte della sonda. 26. Il cosiddetto *standoff* di uno scanner è definito dalla distanza tra la stessa sonda (tastatore o 'probe') di scansione e il campo visivo (FOV) dello scanner.

27. I valori tipici sono migliori del 30% rispetto alla precisione che viene pubblicata.

28. La precisione del sensore viene definita come l'escursione della posizione XY di un manufatto di calibrazione attraverso il campo di misura del sensore.

29. Per essere un *set* di dati significativi debbono essere infatti allineati allo strumento.

30. 'Focus', quale *software* di *reverse engineering* a corredo – appunto – del modello di laser scanner impiegato, supporta l'ispezione intuitiva attraverso il braccio articolato CMM con sensore ottico a scansione, estraendo le caratteristiche geometriche in maniera accurata. Grazie alle migliaia di punti di misura catturati dallo scanner, il *software* di applicazione riesce, mediante il montaggio in diretta della linea, a determinare l'esatta posizione e l'orientamento dei dati acquisiti.

31. Cfr. <http://www.geomagic.com/it/products/wrap/overview>.

32. La decimazione del modello già in tale fase, ovvero la riduzione dei punti della nuvola, è comunque utile per agevolare la gestione di modelli digitali, dal momento che influenza i tempi di caricamento e la medesima agilità di elaborazione.

33. Cfr. G. Tucci, D. Cini, V. Bonora, A. Nobile, *Proposta metodologica per la digitalizzazione 3D di reperti archeologici*, in A. M. Jasink, G. Tucci, L. Bombardieri (a cura di), 'MUSINT. Le Collezioni archeologiche egee e cipriote in Toscana. Ricerche ed esperienze di museologia interattiva', ed. Firenze University Press, Firenze, 2011, p. 84.

34. Un ologramma si ottiene impressionando con il laser una pellicola olografica che viene poi applicata ad una lastra in materiale plastico; è sufficiente proiettare su di essa un fascio di luce per far emergere l'immagine dal suo supporto e vederla a

tre dimensioni. L'illusione ottica dà all'osservatore l'impressione di poter toccare un oggetto reale. Proprio per la resa realistica e tridimensionale e la facilità di fruizione, l'uso di immagini olografiche si rivela particolarmente adatto per mostre e musei multimediali (www.architutto.it).

35. Durante la triangolazione del modello in *mesh*, può accadere che il sistema faccia emergere alcune lacune ed incoerenze che non si potevano prevedere prima.

36. Formato sviluppato da *Wavefront technologies* e può essere usato anche per descrivere entità 3D non *mesh*. Permette infatti di descrivere vertici, coordinate *texture*, normali ai vertici, facce poligonali, ma anche curve, informazioni di renderizzazione, etc. Ogni elemento deve essere enunciato [(v)= vertice; (vn) = normale; (f) = faccia; etc.]

37. <http://meshlab.sourceforge.net/>.

38. <http://www.autodesk.it/products/3ds-max/>.

39. Nell'interfaccia di *MeshLab*, ad esempio, sono disponibili le opzioni di 'Scale Radiance parameters' e di 'Ambient occlusion'. Attraverso quest'ultima tecnica di *shading*, in particolare, è possibile simulare l'attenuazione dell'illuminazione in corrispondenza di spazi occlusi.

40. Il *software open source* CHER-Ob (Cultural Heritage-Object) è stato sviluppato dal *Computer Graphics Group* della Yale University (New Haven, USA) e fornisce un'agevole piattaforma integrata che, supportando la visualizzazione di vari formati digitali, si propone di fornire un efficiente strumento nel campo del Patrimonio Culturale per i ricercatori. La principale caratteristica concettuale di tale piattaforma è la cosiddetta *Cultural Heritage Entity* (CHE) – quale elemento base contenente le informazioni su manufatti o siti – il suo scopo è quello di incentivare l'analisi, la valutazione, la documentazione e la condivisione di progetti relativi a siti o oggetti del Patrimonio Culturale, nonché la gestione per una loro visualizzazione ed interpretazione. (Cfr. W. Shi; E. Kotoula, K. Akoglu, Y. Yang, H. Rushmeier, *CHER-Ob: A Tool for Shared Analysis in Cultural Heritage*, in L. De Luca (ed.), in 'Proceedings of Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage', 2016; <http://graphics.cs.yale.edu/site/>).

41. Il peso specifico della pietra arenaria massiccia è di 2000-2200 kg/m³.

7. Conclusioni

Oggi il processo conoscitivo di manufatti archeologici è legato alla definizione del relativo progetto di *management* culturale in cui l'efficace sinergia fra archeologi e architetti esercita un ruolo di primaria importanza. L'obiettivo documentativo comune diviene il campo d'applicazione entro cui sviluppare un solido approccio olistico, grazie al quale far sintesi fra le reciproche competenze per aggiungere così nuove ed importanti tessere al mosaico delle conoscenze finora disponibili.

Le tappe di questo processo sono state scandite, quindi, nella presente esperienza di ricerca, attraverso la determinazione di un approccio di studio in cui la linea guida è stata dettata dall'interdisciplinarietà fornita dall'efficace e crescente collaborazione con il *Mugello Valley Archaeological Project*, soprattutto nel momento in cui il ritrovamento di un eccezionale reperto etrusco, come la Stele iscritta di Vicchio, ne ha confermato gli intenti dando la svolta decisiva al lavoro di tesi. Infatti in questa il caso applicativo è stato proprio quello di documentare tale monumento, di rappresentarlo e di leggerlo. Mentre la conoscenza delle caratteristiche peculiari del contesto archeologico a cui esso appartiene, il sito etrusco di Poggio Colla, nonché delle emergenze archeologiche ed architettoniche ivi rinvenute – che per ora testimoniano le fasi di vita di un importante santuario dall'VIII al II secolo a.C. – ha costituito una premessa indispensabile; il contenuto del testo in lingua etrusca iscritto sulla sua superficie, probabilmente sacro, può far luce sulle prime credenze di questa civiltà antica e, contestualmente, consentire progressi significativi per lo studio della relativa epigrafia, dal momento che iscrizioni così lunghe sono particolarmente insolite, soprattutto al di fuori di un contesto funerario.

Pertanto, analogamente a tutte le esperienze conoscitive di Beni nel campo del Patrimonio Culturale, ma a mag-

gior ragione quando le peculiari caratteristiche dell'oggetto sono tali da suscitare subito un grande interesse per l'archeologia, la prima tappa è stata costituita dall'analisi di forme e dimensioni, ovvero dal rilievo.

Ciò ha significato, in virtù della varietà delle specifiche esigenze d'indagine, di integrare le informazioni tipiche dell'archeologia con gli specifici precetti della moderna tecnologia 3D, attraverso il campionamento dello spazio denso ed accurato, capace di ricostruire autenticamente la forma della stele restituendo in modo preciso l'irregolare geometria superficiale iscritta. Dal momento che lo studio delle epigrafi resta un argomento di grande interesse per la ricerca archeologica, lo scopo di rendere decifrabili i numerosi grafemi, dallo spessore sub-millimetrico, iscritti sulla superficie della Stele di Vicchio, ha costituito la principale fonte d'indagine verso la quale è stata sperimentalmente orientata e condotta l'intera procedura documentativa di rilievo 3D.

Così l'articolato quadro di riferimento tecnico-teorico ed applicativo, svolto durante la prima parte della tesi, ha costituito il presupposto scientifico in base al quale si sono potute definire le potenzialità della fotogrammetria digitale e dei sensori laser a triangolazione, linea metodologica maggiormente performante in funzione delle aspettative e agli specifici requisiti di *output* preposti alla ricerca per questo particolare monumento. Ciò ha offerto una preziosa occasione per mettere alla prova il sistema, valutarne le potenzialità e verificarne l'applicabilità in un caso applicativo dove accuratezza, precisione e non invasività sono stati i parametri prefissati, quindi vincolanti. La sfida di fornire una rappresentazione digitale ad alta definizione delle iscrizioni di esiguo spessore è stata risolta con un progetto di rilievo sperimentale che ha documentato costantemente lo *status* della Stele durante tutte le operazioni di restauro conservativo – in collaborazione

con la Soprintendenza Archeologia della Toscana che ha eseguito le fasi di pulitura del monumento – mediante una campagna fotografica a luce radente e una preliminare disposizione di punti di riferimento grazie ai quali garantire una sicura rete d'appoggio per le indagini conoscitive. Mentre l'impiego della fotogrammetria digitale è servito a documentare coerentemente lo *status quo* della Stele, restituendone fedelmente il dettaglio morfologico e cromatico nella fase pre-restauro, dall'acquisizione eseguita tramite il laser scanner a triangolazione, una volta terminata la ripulitura della Stele, è stato possibile ricostruire un modello 3D dalle elevate qualità metriche e geometriche. Così l'intero progetto di rilievo, eseguito tramite operazioni ben pianificate prima, durante e dopo la fase di restauro, ha consentito di risolvere le maggiori problematiche connesse all'irregolare geometria dei grafemi iscritti da decifrare. Infatti ha restituito un'autentica ricostruzione 3D della precaria superficie in arenaria, ma ha permesso anche un attento monitoraggio dei risultati, fornendo interessanti spunti di riflessione sull'utilizzo di entrambi i sistemi ottici di rilievo non invasivo. Essi permettono di acquisire velocemente una notevole quantità di dati con un altrettanto livello di dettaglio e completezza, ma una volta terminata la fase di ripresa si pone comunque la necessità che registrare opportunamente ed elaborare coerentemente la mole di informazioni raccolte affinché il futuro collegamento ed inserimento in specifici *database* possa costituire – fra l'altro – un ulteriore vantaggio, non solo in termini di studio del monumento, ma anche ai fini di una sua maggiore tutela, poiché si riduce di fatto la manipolazione del reperto originale. D'altronde oggi la capacità di produrre *output* 3D, utili sia per applicazioni virtuali che per la ricerca, esige che l'insieme dell'esperienze maturate sul campo si confrontino imprescindibilmente con specifiche

conoscenze e competenze sugli avanzati *software* informatici disponibili che, in virtù di una continua evoluzione delle macchine *hardware*, permettono di elaborare i dati raccolti e di produrre al contempo, in funzione degli obiettivi, nuove tipologie di prodotti ed applicazioni virtuali.

Quindi l'impiego di tale linea metodologica, che ha utilizzato sperimentalmente la fotogrammetria digitale ed un sistema laser a triangolazione, se svolto con procedure pianificate e rigorose, ha dimostrato non solo di condurre ad un prodotto metricamente corretto, che può divenire la base di elaborazioni ed analisi di varia natura, ma anche la possibilità di archiviare dati da poter comunicare e trasmettere con facilità. Peraltro il *management* del progetto di rilievo per la Stele di Vicchio si è orientato da un lato attraverso la ricerca e la conoscenza del monumento e dall'altro verso la sua tutela e la sua valorizzazione. Questo, tuttavia, non ha potuto prescindere dalle componenti comunicative e di visualizzazione che rendono attualmente visibile e riconoscibile il reperto. In tal senso, infatti, tutta la documentazione si è concretizzata nella produzione di *output* 3D finali in grado di soddisfare sia le esigenze della ricerca scientifica che i requisiti di musealizzazione virtuale per una sua più ampia diffusione.

Nel primo caso il risultato è stato raggiunto direttamente dalla stessa geometria del modello 3D ad alta definizione, poiché tramite la sua semplice visualizzazione ed esplorazione in ambiente virtuale, è stato possibile rintracciare, in modo agevole, i numerosi grafemi 'iscritti' sulla superficie *mesh* ricostruita. Questo tipo di rappresentazione supporta in pieno la complessa sfida della loro traduzione ed interpretazione, ancora in corso; il contenuto delle iscrizioni sta rivelando informazioni decisive riguardo la religione, l'epigrafia e forse anche la lingua etrusche.

Nel secondo caso, invece, la stampa del modello 3D della Stele di Vicchio su un innovativo dispositivo olografico non solo ha mostrato un concreto *feedback* per l'esperienza di ricerca ma, essendo parte centrale della mostra 'Scrittura e culto a Poggio Colla: un santuario etrusco nel Mugello', ha costituito una prima occasione per tramettere il processo conoscitivo svolto tramite un inedito ed aggiornato paradigma legato alla rappresentazione coerente del contesto archeologico a cui la Stele di Vicchio appartiene, aprendo la ricerca a futuri sviluppi.

Bibliografia

AA. VV., *Recording, Documentation and Information Management for the Conservation of Heritage Places*, Getty J. Paul, Trust, Los Angeles, vol. I e II, 2007.

AA.VV., *Scrivere Etrusco. Dalla leggenda alla conoscenza. Scrittura e letteratura nei massimi documenti della lingua italiana*, ed. Electa, Milano, 1985.

Abdel-Aziz Y.I., Karara H.M., *Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry*, in 'Proc. Symposium on Close-Range', 1971.

Acka D., Gruen A., *Comparative geometric and radiometric evaluation of mobile phone and still video cameras*, in 'The Photogrammetric Record', 2009, vol. 24 (127).

Amoruso G., Apollonio F.I., Remondino F., *Caratterizzazione strumentale di sensori attivi a tempo di volo (ToF) e a triangolazione. Utilizzo di laser scanner su superfici marmoree di epoca romana*, in Benedetti B., Gaiani M., Remondino F. (a cura di), 'Modellazione tridimensionale e modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei', edizioni della Normale, Pisa, 2010.

Apollonio F.I., Gaiani M., Manfredini A.M., *Modellazione semantica metodi a multirisoluzione*, in Benedetti B., Gaiani M., Remondino F. (a cura di), 'Modellazione tridimensionale e modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei', edizioni della Normale, Pisa, 2010.

Apollonio F.I., Gaiani M., Remondino F., *Una pipeline per l'acquisizione di dati 3D*, in Benedetti B., Gaiani M., Remondino F. (a cura di), 'Modellazione tridimensionale e modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei', edizioni della Normale, Pisa, 2010.

Apollonio F.I., *Geometria descrittiva e disegno tecnico nell'era della rivoluzione industriale*, in AA.VV., 'Rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente: principi costruttivi del progetto tra artificio e natura', MURST, Rodano (MI), 1998.

Apollonio F.I., Remondino F., *Modellazione 3D da sensori attivi Pipeline con laser scanner*, in Benedetti B., Gaiani M., Remondino F. (a cura di), 'Modellazione tridimensionale e modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei', edizioni della Normale, Pisa, 2010.

Aranguren B., Revedin A. (a cura di), *Un accampamento di 30.000 anni fa a Bilancino* (Mugello, Firenze), ed. Origines, Firenze, 2008.

Aterini B., *Guidobaldo del Monte (1545-1607)*, in Cigola M., 'Distinguished Figures in Descriptive Geometry and Its Applications for Mechanism Science: From the Middle Ages to the 17th Century', serie History of Mechanism and Machine Science, ed. Springer, 2014.

Aterini B., *Introduzione ai metodi di rappresentazione della Geometria Descrittiva*, ed. Alinea, Firenze, 2009.

Aterini B., *Appunti dalle lezioni del corso di Fondamenti e Applicazioni della Geometria Descrittiva*, ed. Alinea, Firenze, 2000.

Aterini B., *Il ruolo dello 'strumento' geometria nella lettura e nella rappresentazione dell'architettura*, in Aterini B., Corazzi R. (a cura di) 'La geometria tra didattica e ricerca', ed. AREA Firenze, Firenze, 2008.

Aterini B., *Introduzione ai Metodi di Rappresentazione della Geometria Descrittiva*, ed. Alinea, Firenze, 2009.

Baldassini S., Gaiani M., Remondino F., *Rilievo, gestione e mappatura del colore*, in Benedetti B., Gaiani M., Remondino F. (a cura di), 'Modellazione tridimensionale e modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei', edizioni della Normale, Pisa, 2010.

Balistreri C., *Il cielo era caramellu loso*, in Balestreri C., Peronuzzi G., Trincanato E. R., '3 a 4, nel rilievo. Comunicazioni per un corso di Disegno e Rilievo' Lavoro di ricerca scientifica (art. 1, DDL 31.08.1941, n. 660) depositato presso la Procura della Repubblica di Venezia.

Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., *Automated and accurate orientation of complex image sequences*, in 'International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences', vol. XXXVIII (5/W16), Trento, 2011.

Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M., *Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects*, in 'Videometrics, Range Imaging and Applications X, Processing of SPIE Optics+Photonics', vol. 7447, San Diego, CA, USA, 2010.

Barazzetti L., Roncella R., Forlani G., Remondino F., Scaioni M., *Orientamento automatico di blocchi fotogrammetrici in ambito close-range: stato dell'arte e prospettive della ricerca*, in Manzino A., Spalla A., 'Geomatica, le radici del futuro. Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galletto', Pavia, 2011.

Barceló J. A., *3D modelling and shape analysis in archaeology*, in Remondino F., Campana S. (a cura di), '3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and best practises', ed. BAR (British Archaeological Reports) International series 2598, 2014.

Baribeau R., Rioux M., *Influence of speckle on laser range finders*, in Driggers R. (a cura di), 'Applied optics', vol. 30, n. 20, OSA, USA, 1991.

Barthes R., *Éléments de sémiologie*, Seuil, Paris, 1964 – trad. it. 'Elementi di semiologia', ed. Einaudi, Torino, 1966.

Barthes R., *La camera chiara. Nota sulla fotografia*, ed. Einaudi, Torino, 1980.

Benedetti B., Gaiani M., Remondino F. (a cura di), *Modellazione tridimensionale e modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei*, edizioni della Normale, Pisa, 2010.

Beraldin J.A., Blais F., Boulanger P., Cournoyer L., Domez J., El-Hakim S., Godin G., Rioux M., Taylor J., *Real world modeling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures*, in 'ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing', 55(4), 2000.

Beraldin J.A., Blais F., El-Hakim S., Cournoyer L., Picard M., *Traceable 3D Imaging Metrology: Evaluation of 3D Digitizing Techniques in a Dedicated Metrology Laboratory*, in '8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques Proceedings', Zurich, 2007.

Bergson H., *Matière et mémoire: Essai sur la relation du corps à l'esprit*, 1911; trad. it. A. Pessina (a cura di), 'Materia e memoria: Saggio sulla relazione tra il corpo e lo spirito', ed. Laterza, 1996.

Bernardini F., Mittleman J., Rushmeier H., Silva C., Taubin G., *The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction*, in 'IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics', vol. 5, 1999.

Bernardini F., Rushmeier H., Martin I.M., Mittleman J., Taubin G., *Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta*, in 'IEEE Computer Graphics Application', vol. 22, 2002.

Bezzi A., Bezzi L., Benjamin D., *Computer Vision e Structure From Motion, nuove metodologie per la documentazione archeologica tridimensionale: un approccio aperto*, in De Felice G., Sibilano M.G. (a cura di), 'AR-CHEOFOSS 2010', ed. Edipuglia, Bari, 2011.

Bini M., *Verso il rilievo automatico*, in Sacerdote F., Tucci G. (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', ed. Alinea, Firenze, 2007.

Bitelli G., Girelli V.A., Remondino F., Vittuari L., *The potential of 3D Techniques for Cultural Heritage Object Documentation*, in Beraldin J.A., Remondino F., Shortis M.R., 'Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 6491', Videometrics IX, 64910S, San Jose, CA, USA, 2007.

Bitelli G., Girardi F., Girelli V.A., *Digital enhancement of the 3D scan of Suhi I's stele from Karkermish* (Tab. VII-IX), in 'Orientalia', Pontificium Institutum Biblicum, vol. 83, fasc. 2, 2014.

Blachut T. J., Burkhardt R., *Historical Development of Photogrammetric Methods and Instruments*, ASPRS Science and Engineering, USA 1991.

Bonora V., Tucci G., *Il laser scanner terrestre e il rilievo dei Beni Culturali*, in Sacerdote F., Tucci G. (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', ed. Alinea, Firenze, 2007.

Brown D.C., *Close-range camera calibration*, in 'PE&RS', vol. 37(8), 1971.

Campana S., *3D Modelling in archaeology and cultural heritage – theory and best practice*, in Remondino F., Campana S. (a cura di), '3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and best practises', ed. BAR (British Archaeological Reports) International series 2598, 2014.

Camporeale G., *Ager Faesulanus: Poggio Colla*, in 'Studi Etruschi', n. 75, 2012.

Cannarozzo M.L., Salerno R., *Fotografia e Misura*, ed. Cluva Città Studi, Milano, 1991.

Carr J.C., Beatson R.K., Cherrie J.B., Mitchell T.J., Fright W.R., McCallum B.C., Evans T.R., *Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions*, in ComputerGraphics, in 'SIGGRAPH01 Proceedings', 2001.

Castor A., *An Early Hellenistic Jewelry Hoard from Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in 'Memoirs of the Ame-

rican Academy in Rome', vol. 54, American Academy in Rome, 2009.

Cateni G., *Segni d'Etruria. La scrittura etrusca fra VII e I secolo a.C.*, Catalogo della Mostra, Museo Archeologico Villa Guerrazzi, Cecina (Li), 2005.

Caunguilhem G., *Modeles et analogies dans la découverte en biologie*, in 'Études d'Histoire et de Philosophie des Sciences', Vrin, Paris, 1970.

Chapman J., *Fragmentation in Archaeology. People, Places, and Broken objects in the prehistory of South Eastern Europe*, London-New York, 2000.

Chellini R., *Firenze. Carta Archeologica della Provincia: Valdarno superiore, Val di Sieve, Mugello, Romagna toscana*, in 'Journal of Ancient Topography', supp. 7, ed. Congedo, Galatina (LE), 2013.

Chellini R., *Un'area di passaggio tra l'Etruria tirrenica e l'Etruria adriatica: il territorio fiesolano (IX-III sec. a.C.)*, in 'Journal of Ancient Topography', n. 23, 2013.

Cignoni P., Medioni G., *Object modeling by registration of multiple range images*, in 'Image and Vision Computing', vol. 10-3, 1998.

Cundari C., *Censimento e catalogazione dei beni culturali*, in G. Fano (a cura di), 'Censimento e catalogo dei Beni Culturali', ed. SAFRA, Bari, 1982.

Cundari C., *Fotogrammetria architettonica*, ed. Kappa, Roma, 1983.

Curless B., Levoy M., *A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images*, in 'SIGGRAPH96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques', 1996.

Davis J., Marschner S.R., Garr M., Levoy M., *Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion*, in 'Proceedings 3D Processing Visualization and Transmission', 2002.

- De Luca L., *La fotomodellazione architettonica*, ed. Dario Flaccovio, Palermo, 2011.
- De Rosa A., Sgrosso A., Giordano A., *La Geometria nell'Immagine*, vol. 1, Dall'Antichità al Medio Evo, ed. UTET, 2000.
- De Rosa A., Sgrosso A., Giordano A., *La Geometria nell'Immagine*, vol. 2, Rinascimento e Barocco, ed. UTET, 2000.
- De Sanctis A., *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano*, ed. Ermes, Ariccia (RM), 2015.
- Delaunay B., *Sur la sphère vide*, Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelene Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk, 1934.
- Deng C., *Registration between Multiple Laser Scanner Data Sets*, in 'Laser Scanning, Theory and Applications', Chau-Chang Wang (ed.), Rijeka, Croatia, 2011.
- Descartes R., *Discours de la Méthode*, 1637, IV; trad. it. 'Discorso sul metodo', ed. Mondadori, Milano, 1993.
- Descartes R., *Meditationes de prima philosophia*, Soly, Paris, trad.it. 'Opere', ed. Laterza, Bari, vol. I-III, 1967.
- Desgodetz A., *Les édifices antiques de Rome*, Paris, 1682.
- Docci M., Maestri D., *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, ed. Laterza, 2009.
- Donati L., *Gli scavi di Poggio Civitella (Montalcino, Siena) 1993-1998*, in 'Etruscan Studies', vol. 6, 1999.
- Eco U., *Semiotica e filosofia del linguaggio*, Conferenza all'Università di Caracas, 1994, ed. Einaudi, 1997.
- Faugeras O., Toscani G., *The calibration problem for stereo*, in 'Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'86)', Miami Beach, Fla, USA, 1986.
- Fedeli, L., Warden P.G., *Recenti scavi a Poggio Colla (Vicchio)*, in 'Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana', 334-337. Firenze, Soprintendenza Archeologica Toscana, 2006.
- Fondelli M., *I fondamenti della fotogrammetria nella prima esperienza prospettica di Filippo Brunelleschi*, in 'Bollettino degli Ingegneri della Toscana XXV', 11, 1977.
- Fondelli M., *Trattato di Fotogrammetria urbana e architettonica*, ed. Laterza, Bari, 1992.
- Fraser C.S., *Network design*, in Atkinson K.B. (ed.), 'Close-range Photogrammetry and Machine Vision', Whittles Publishing, UK, 1996.
- Frege F.G., *Logica e Matematica*, trad. it. L. Geymonat, C. Mangione, ed. Boringhieri, Torino, 1977.
- Frege G., *Aritmetica e Logica*, trad. it. L. Geymonat, ed. Giulio Einaudi, Torino, 1948.
- Gaiani M., *Smart City: dal rilievo ex-post al rilievo ex-ante*, in Unali M., 'Atlante dell'Abitare Virtuale. Il Disegno della Città Virtuale, fra Ricerca e Didattica', ed. Gangemi, Roma, 2014.
- Geymonat G., Giorello G., *Modello*, in 'Enciclopedia Einaudi', ed. Einaudi, Torino, vol. IX, 1981.
- Ghosh S.K., *History of Photogrammetry, Analytical Methods and Instruments*, in 'International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences', vol. XXIX(VI), Canada, 1992.
- Gil F., *Rappresentazione*, in 'Enciclopedia Einaudi', ed. Einaudi, Torino, vol. XI, 1981.
- Goldstein K., *Der Aufbau des Organismus*, Nijhoff, Den Haag 1934, trad. fr. 'La Structure de l'organisme', Paris, 1951.
- Gomarasca M.A., *Basics of Geomatics*, ed. Springer Science & Business Media, 2009.

- Gualtieri A., Vettore A., *Tecniche di registrazione*, in Sacerdote F., Tucci G. (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', Firenze, Alinea, 2007.
- Guidi G., Russo M., Magrassi G., Bordegoni M., *Performance Evaluation of Triangulation Based Range Sensors*, in *Sensors*, vol. 10, 2010.
- Guidi G., *Terrestrial optical active sensors – theory and applications*, in F. Remondino, S. Campana (a cura di), '3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and best practises', ed. BAR (British Archaeological Reports) International series 2598, 2014.
- Heikkilä J., Silven O., *A four-step camera calibration procedure with implicit image correction*, in 'IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97)', San Juan, Puerto Rico, 1997.
- Hirschmüller H., *Stereo processing by semi-global matching and mutual information*, in 'IEEE Transaction on Pattern analysis and Machine intelligence', vol. XXX, 2008.
- International Vocabulary of Metrology, Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*, III ed., Pavillon de Breteuil, Francia, 2008, (JCGM 200:2008).
- Jähne B., Haußecker H., Geißler P., *Handbook of Computer Vision and Applications*, Academic Press, San Diego, USA, 1999.
- Kane S., *An Archaic Tumulus: Old and New Evidence from the Poggio Colla Necropolis*, in 'Experientia Docet, a symposium in honor of Lucy Shoe Meritt', University of Texas, Austin, TX, 1996.
- Kane S., Warden P.G., *Field Report for 1995 Season at Poggio Colla, Vicchio (Tuscany)*, in 'Archaeological Institute of American Annual Meeting', San Diego, CA, 1995.
- Kane S., P.G. Warden, N. Griffiths. *A Bronze Head of a Youth from Poggio Colla (Vicchio)*, Tuscany, in 'Etruscan Studies 5', 1998.
- Kane S., Warden P.G., Mona D., Canuti P., *The 1995-1996 Seasons of the SMU Excavations at Poggio Colla, Vicchio (Tuscany)*, in 'Archaeological Institute of America Annual Meeting', New York, 1996.
- Levoy M., Pulli K., Curless B., Rusinkiewicz S., Koller D., Pereira L., Ginzton M., Anderson S., Davis J., Ginsberg J., Shade J., Fulk D., *The digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*, SIGGRAPH00, 2000.
- Li J., Guo Y., Zhu J., Lin X., Xin Y., Duan K., Tang Q., *Large depth-of-view portable three dimensional laser scanner and its segmental calibration for robot vision*, in 'Optics and Lasers in Engineering', vol. 45, rss.sciencedirect.com, 2014.
- Lowe D.G., *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*, in 'International Journal of Computer Vision', vol. 60 (2), 2004.
- Lu F., Milios E., *Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans*, in 'Journal of Intelligent and Robotic Systems', ed. Springer, vol. 18(3), 1997.
- Lucas B. D., Kanade T., *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*, in 'Proc 7th Intl Joint Conf on Artificial Intelligence (IJCAI)', Vancouver, 1981.
- MacKinnon D., Beraldin J.A., Cournoyer L., Blais F., *Evaluating laser range scanner lateral resolution in 3D metrology*, in 'Proceedings SPIE 7239, Three-Dimensional Imaging Metrology', vol. 7239, San Jose, CA, 2009.
- Maggiani A., *The Vicchio Stele: The Inscription*, in 'Etruscan Studies 2016. Journal of the Etruscan Foundation', vol. 19(2), ed. De Gruyter, USA, 2016.
- Manacorda D., *Lezioni di archeologia*, ed. Laterza, Bari, 2008.
- Manfredini A.M., Remondino F., *Modellazione 3D da immagini Pipeline fotogrammetrica*, in Benedetti B., Gaiani

M., Remondino F. (a cura di), 'Modellazione tridimensionale e modelli digitali 3D in Archeologia: il caso di Pompei', edizioni della Normale, Pisa, 2010.

McCamy C.S., Marcus H., Davidson J.G., *A Color Rendition Chart*, in 'Journal of Applied Photographic Engineering', vol. 11(3), 1976, (<http://www.xrite.com/>).

Meyers G. E., *Weaving as Worship: Women and Ritual at the Etruscan Site of Poggio Colla (Vicchio)*, in '111th Annual Meeting of the Archaeological Institute of America', Anaheim, 2010.

Meyers, G., J. Galloway & L. Jackson, *Terracotta Tiles and Roof Technology at the N. Etruscan Settlement of Poggio Colla*, in 'Archaeological Institute of America Annual Meeting', San Diego, January, 2007.

Migliari R., *Per una teoria del rilievo architettonico*, in R. Migliari (a cura di), 'Disegno come modello', ed. Kappa, Roma, 2004.

Mikolajczyk K., Schmid C., *A performance evaluation of local descriptors*, in 'IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence', vol. 27(10), 2005.

Milli M., Surace L., *Le linee della costa. Definizioni, riferimenti altimetrici e modalità di acquisizione dei dati*, ed. Alinea, Firenze, 2011.

Mingues J., Lamiroux F., Montesano L., *Metric-Based Scan Matching Algorithms for Mobile Robot Displacement Estimation*, in 'Robotics and Automation', ICRA/IEEE, 2005.

Moles A., *Teoria informazionale dello schema*, in A.A. V.V., 'Versus', n. 2, 1972.

Montani, C. Rocchini, R. Scopigno, *Tecnologie 3d Scanning. Introduzione e Valutazione Comparativa*, C.N.R. Pisa, Pisa, 2001.

Monti C. et al., *Per un moderno rilievo della basilica di San Lorenzo tra opera, progetto e trasformazioni*, in Fieni

L. (a cura di), 'La costruzione della basilica di San Lorenzo a Milano', ed. Silvana, Milano 2004.

Nitzan D., Brian A.E., Duda R.O., *The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis*, in IEEE, vol. 65, n. 2, 1977.

Nitzan D., *Three-dimensional vision structure for robot applications*, in 'IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)', vol. 10, n. 3, 1988.

Nocentini A., *Vicchio (Fi). L'intervento di restauro della stele di Poggio Colla: primi rilievi per lo studio delle epigrafi*, in 'Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana', Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, vol. 11/2015, ed. All'insegna del Giglio, Firenze, 2016.

Papadaki A.I., Agrafiotis P., Georgopoulou A., Prignitz S., *Accurate 3D scanning of damaged ancient Greek inscriptions for revealing weathered letters*, in 'The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences', vol. 40, 2015.

Perkins P., *On the Edge of Etruria: Early Etruscans in Apennines*, Accordia joint lecture with the UCL Institute of Archaeology Londra, 2016.

Perkins P., *The Bucchero Childbirth Stamp on the Late Orientalizing Period Shard from Poggio Colla*, in 'Etruscan Studies', vol. 15(2), 2012.

Pierrot-Deseilligny M., Paparoditis N., *A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from SPOTS-HRS stereo imagery*, in 'IAPRS', vol. XXXVI (1/W41), Ankara, 2006.

Quatremère de Quincy A.C., *Dictionnaire historique de l'architecture*, 1832, voll. 1-2.

Quintero M.S., *Introduction*, in Remondino F., Campana S. (a cura di), '3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and best practises', ed.

BAR (British Archaeological Reports) International series 2598, 2014.

Rask, K., *The Courtyard Altar at Etruscan Poggio Colla: Animal Sacrifice and Topographic Placement*, in '114th Annual Meeting of the Archaeological Institute of America', Seattle, 2013.

Reinhard E., Ward G., Pattanaik S., Debevec P., *High dynamic range imaging: acquisition, display and image-based lighting*, ed. Morgan Kaufmann Publisher, San Francisco USA, 2005.

Remondino F., Campana S. (a cura di), *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and best practises*, ed. BAR (British Archaeological Reports) International series 2598, 2014.

Remondino F., El-Hakim S., *Turning images into 3D models – Development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects*, in 'IEEE Signal Processing Magazine', vol. XXV, 2008.

Remondino F., El-Hakim S.F., *Image-based 3D modeling: a review*, in 'Photogrammetry Record', vol. 21, n. 115, 2006.

Remondino F., Fraser C., *Digital camera calibration methods: considerations and comparisons*, in 'IAPRS', vol. XXXVI(5), Dresden, 2006.

Remondino F., *From point cloud to surface: the modeling and visualization problem*, in 'The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences', vol. 34, n. 5/W10, Switzerland, 2003.

Remondino F., *Geomatics and cultural heritage*, in Remondino F., Campana S. (a cura di), '3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and best practises', ed. BAR (British Archaeological Reports) International series 2598, 2014.

Remondino F., *Photogrammetry*, in Remondino F., Cam-

pana S. (a cura di), '3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage, Theory and best practises', ed. BAR (British Archaeological Reports) International series 2598, 2014.

Remondino F., *Rilievo e modellazione 3D di siti e architettura complesse*, in Ippoliti E., Meschini A. (a cura di), 'Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale', DISEGNARECON, vol. 4, n. 8, Roma, 2011.

Rinaudo F., *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in Sacerdote F., Tucci G. (a cura di), 'Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio', ed. Alinea, Firenze, 2007.

Russo M., Remondino F., Guidi G., *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*, in AA.VV., 'Archeologia e Calcolatori', n. XII, ed. All'Insegna del Giglio, 2011.

Sacerdote F., Tucci G. (a cura di), *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Firenze, Alinea, 2007.

Sagawa, R. Ikeuchi K., *Hole filling of a 3D model by flipping signs of a signed distance field in adaptive resolution*, in 'IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI', vol. 30, n. 4, 2008.

Salvi J., Matabosch C., Fofi D., Forest J., *A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation*, in 'Image and Vision Computing', vol. 25, n. 5, 2007.

Sanesi G., *Geologia e morfologia dell'antico bacino lacustre del Mugello-Firenze: con una nota sull'industria litica del dr. A. Palma di Cesnola*, in 'Bollettino della Società Geologica Italiana', vol. 84.3, 1965.

Sarti S., *Vicchio (Fi): il recupero di una stele etrusca iscritta*, in 'Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana', Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, vol. 11/2015, ed. All'insegna del Giglio, Firenze, 2016.

Searle J., *Vedere le cose come sono, una teoria della percezione*, ed. Raffaello Cortina, 2016.

Seitz S., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R., *A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms*, in 'IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition', New York, NY, 2006.

Selvini A., *Edoardo De Orel: la fotogrammetria diventa adulta*, in 'GEOmedia', vol. 17, n. 4, 2013.

Shan J., Toth C.K., *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, ed. CRC Press, 2008.

Shi W.; Kotoula E., Akoglu K., Yang Y., Rushmeier H., *CHER-Ob: A Tool for Shared Analysis in Cultural Heritage*, in De Luca L. (ed.), 'Proceedings of Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage', 2016, (<http://graphics.cs.yale.edu/site/>).

Soucy M., Laurendeau D., *A general surface approach to the integration of a set of range views*, in 'IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI', vol. 17, n. 4, 1995.

Steiner, A., Meyers G. E., Thomas M. L., Warden P.G., *Defining a Sanctuary in Northern Etruria: New Evidence from Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in '113th Annual Meeting of the Archaeological Institute of America', Philadelphia, 2012.

Steiner, A., Thomas M., Meyers G., Warden P.G., *Sanctuary and Settlement in Northern Etruria: New Evidence from Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in '108th Annual Meeting of the Archaeological Institute of America', San Diego, 2007.

Szeliski R., *Computer Vision: Algorithm and Applications*, ed. Springer, 2010.

Thomas M.L., *One Hundred Victoriati from the Sanctuary at Poggio Colla (Vicchio di Mugello): Ritual Contexts and Roman Expansion*, in 'Etruscan Studies', vol. 15(1), 2012.

Thomas, M.L., *The Technology of Daily Life in an Hellenistic Etruscan Settlement: New Evidence from Poggio Colla*, in 'Archaeological Institute of America Annual Meeting', Dallas, Texas, 1999.

Thomas, M.L. and P.G. Warden, *The Hellenistic Habitation and Workshop at Podere Funghi (Poggio Colla)*, in 'AIA Annual Meetings', New Orleans, January 6, 2003.

Toynbee, A., *A study of History*, riassunto dei volumi I-VI da parte di D.C. Somerwell, Oxford University Press, 1947; trad. it. 'Le Civiltà nella Storia', ed. Einaudi, Torino 1950.

Tsai R.Y., *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*, in 'IEEE Int. Journal Robotics and Automation', vol. 3(4), 1987.

Tucci G., Cini D., Bonora V., Nobile A., *Proposta metodologica per la digitalizzazione 3D di reperti archeologici*, in A. M. Jasink, G. Tucci, L. Bombardieri (a cura di), 'MUSINT. Le Collezioni archeologiche egee e cipriote in Toscana. Ricerche ed esperienze di museologia interattiva', ed. Firenze University Press, Firenze, 2011.

Turk G., Levoy M., *Zippered polygon meshes from range images*, in 'Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics', 1994.

Ugo V., *μίμησις - mimesis. Sulla critica della rappresentazione dell'architettura*, ed. Maggioli, Milano, 2008.

Vagnetti L., *De naturali et artificiali perspectiva: bibliografia ragionata delle fonti teoriche e della storia della prospettiva: contributo alla formazione della conoscenza di un'idea razionale, nei suoi sviluppi da Euclide a Gaspard Monge*, ed. Libreria Editrice Fiorentina, Firenze, vol. 2, 1979.

Vergauwen M., Van Gool L., *Web-based 3D Reconstruction Service*, in 'Machine Vision and Application. An International Journal', ed. Springer, vol. 17, 2006.

Warden P. G., *Giving the Gods their Due: Ritual Evidence*

from Poggio Colla. With an appendix by A. Trentacoste, in 'Francesco Nicosia. L'archeologo e il soprintendente. Scritti in memoria. Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana', supp. 1, n. 8/12, Firenze, 2012.

Warden P.G. and Kane S., *Excavations at Poggio Colla (Vicchio) 1995-1996*, in 'Etruscan Studies 4', 1997.

Warden P.G., *The Vicchio Stele and its Context*, in *Etruscan Studies 2016*, in 'Journal of the Etruscan Foundation', vol. 19(2), ed. De Gruyter, USA, 2016.

Warden P.G., Thomas M.L., Steiner A., Meyers G., *Poggio Colla: a N Etruscan settlement of the 7th-2nd c. B.C. (1998-2004 excavations)*, in 'Journal of Roman Archaeology', vol. 18, 2005.

Warden P.G., *Una scoperta recente: la stele iscritta del santuario etrusco di Poggio Colla*, in Perazzi P., Poggesi G., Sarti S. (a cura di), 'L'Ombra degli Etruschi. Simboli di un popolo fra pianura e collina', ed. Edifir, Firenze, 2016.

Warden P.G., *Remains of the Ritual at the Sanctuary of Poggio Colla*, in *Votives, Places, Rituals*, in 'Etruscan Religion. Studies in Honor of Jean MacIntosh Turfa', edited by M. Gleba and H. Becker. Religion in the Graeco-Roman World (RGRW), Leiden, 2009.

Warden P.G., *The Temple is a Living Thing: Fragmentation, Enchainment, and the Reversal of Ritual at the Acropolis Sanctuary of Poggio Colla.*, in 'The Archaeology of Sanctuaries and Ritual in Etruria', ed. Nancy de Grummond, Supplementary volume to the Journal of Roman Archaeology, 2010.

Warden P.G., *Vicchio (FI). Recenti scavi (2008) a Poggio Colla*, in 'Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana 4', Firenze, Soprintendenza Archeologica Toscana, 2009.

Warden P.G., *Presentation of the bronze head found in 1995*. Colloquium on Etruscan bronzes in honor of Emeli-

ne Hill Richardson, in 'Archaeological Institute of American Annual Meeting', San Diego, CA, 1995.

Warden P.G., *Southern Methodist University Excavations in Tuscany*. A Preliminary Report for Friends and Supporters, Dallas, 1995.

Warden P.G., *Excavations at the Etruscan Site of Poggio Colla: Fiesole and the Cultural Geography of the Mugello Valley*, in 'Experientia Docet, a symposium in honor of Lucy Shoe Meritt', University of Texas, Austin, TX, 1996.

Warden P.G., *Southern Methodist University Excavations at the Etruscan Site of Poggio Colla (Vicchio di Mugello). The 1997 Season*, Dallas and Philadelphia, 1997.

Warden P.G., *Excavations at the Etruscan Site of Poggio Colla (Vicchio di Mugello). The 1998 Season*, Philadelphia, 1998.

Warden P.G., *New Evidence for Ritual at Poggio Colla*, in '109th Annual Meeting of the Archaeological Institute of America', Chicago, 2008.

Warden P.G., *Monumental Embodiment: Somatic Symbolism and the Tuscan Temple*, in 'Monumentality in Etruscan and Early Roman Architecture: Ideology and Innovation. Festschrift in Honor of Ingrid Edlund Berry', edited by Thomas M.L. and Meyers G., The University of Texas Press, Austin, 2012.

Warden P.G., Thomas M.L., *Sanctuary and Settlement: Archaeological Work at Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in 'Etruscans Now Conference at the British Museum', London, December 11, 2002.

Warden P.G., Thomas M.L., (forthcoming), *Evidenza di culto e problemi di continuità culturale al sito Etrusco di Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in 'Piana Fiorentina, Valdarno e aree limitrofe. Studi recenti e nuovi dati dalla ricerca archeologica', ed. G. Bartoloni, 2005.

Warden P.G., Thomas M.L., *Excavations at Poggio Colla: The 1998 Season*, in 'Etruscan Studies 6', 1999.

Warden P.G., Thomas M.L., *Excavations at Poggio Colla: the 1999 Season*, in 'Etruscan Studies 7', 2000.

Warden P.G., Thomas M.L., *Sanctuary and settlement: archaeological work at Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in 'Etruscan Studies 9-10', 2002-2003.

Warden P.G., Thomas M.L., *Culto e continuità culturale a Poggio Colla (Vicchio di Mugello)*, in 'Piana Fiorentina, Valdarno a aree limitrofe. Studi recenti e nuovi dati dalla ricerca archeologica.' Secondo Seminario Internazionale di Studi Città di Montefiascone, Montefiascone (Italy), 2005.

Warden P.G., Thomas M. L., Vellucci K., *The SMU/University of Pennsylvania Excavations at the Etruscan Site of Poggio Colla (1997-1998)*, in 'Archaeological Institute of America Annual Meeting', Washington, DC, 1998.

Warden P.G., Thomas M.L., Steiner A., Meyers G., *The Etruscan Settlement of Poggio Colla (1998-2004 excavations)*, in 'Journal of Roman Archaeology 18', 2005.

Warden P.G., Thomas M.L., Galloway J., *Excavations at the Etruscan Settlement of Poggio Colla: the 1995-1998 Seasons*, in 'Journal of Roman Archaeology 12', 1999.

Warden P.G., Kane S., Vellucci K., White D., *Southern Methodist University Excavations at the Etruscan Site of Poggio Colla (Vicchio di Mugello). The 1996 Season*, Dallas and Philadelphia, 1996.

Warden P.G., *Vicchio (FI). Poggio Colla. Campagna di scavo 2006*, in 'Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana', Firenze, Soprintendenza Archeologica Toscana, 2007.

Weng J., Cohen P., Herniou M., *Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation*, in 'IEEE Trans. on PAMI', vol. 14(10), 1992.

Winkler J.J., Tykot R.H., *Provenance of Etruscan Pottery from Poggio Colla, Italy: A Chemical Characterization Study*, in 'Archaeological Institute of America Annual Meeting', Philadelphia, 2002.

Ringraziamenti

Si ringraziano:

Mugello Valley Archaeological Project MVAP, Consorzio di università americane ed europee (Southern Methodist University of Pennsylvania, Franklin and Marshall of Texas, Open University UK) diretto dall'archeologo, prof. Gregory Warden, rettore della Franklin University Switzerland a Lugano.

Soprintendenza ABAP per la Città Metropolitana di Firenze e le Province di Prato e Pistoia (ex-Soprintendenza Archeologia della Toscana) in particolare il funzionario di zona dott.ssa Susanna Sarti.

Centro di Restauro della Soprintendenza ABAP per la Città Metropolitana di Firenze e le Province di Prato e Pistoia, in particolare la direttrice dott.ssa Francesca Galli, il funzionario geologo Pasquino Pallecchi, il restauratore Stefano Sarri.

Laboratorio di Geomatica per la Conservazione e la Comunicazione dei Beni Culturali GECO (direttore prof. ssa Grazia Tucci) dell'Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale DICEA, in particolare la dott.ssa Valentina Bonora per l'aiuto ed i preziosi consigli.

Direttore degli scavi archeologici di Poggio Civitate a Murlo, prof. Anthony Tuck (University of Massachusetts UMASS Amherst, Classics Department).

Studio *Architutto Designer's* di Viterbo, specializzato nella rappresentazione d'immagini olografiche, in particolare il dott. Arch. Massimo Legni, e lo Studio *Ceramicus* (New York City, USA) di Gary Enea per le proiezioni olografiche.

Abstract

Oggi il processo conoscitivo di manufatti archeologici è legato alla definizione del relativo progetto di management culturale in cui l'efficace sinergia fra archeologi ed architetti esercita un ruolo di primaria importanza. L'obiettivo documentativo comune diviene il campo d'applicazione entro cui sviluppare un solido approccio olistico, grazie al quale operare una sintesi fra le reciproche competenze, per aggiungere nuove ed importanti tessere al mosaico delle conoscenze. Le tappe di questo processo sono state scandite, quindi, nella presente esperienza di ricerca, attraverso la determinazione di un approccio di studio in cui la linea guida è stata dettata dall'interdisciplinarietà, fornita dall'efficace e crescente collaborazione con il *Mugello Valley Archaeological Project* - Consorzio di università americane ed europee - soprattutto nel momento in cui il ritrovamento negli scavi sul Poggio Colla, nel comune di Vicchio del Mugello, di un eccezionale reperto etrusco come la Stele iscritta, ne ha confermato gli intenti, dando la svolta decisiva al lavoro di tesi. Si tratta di una grande lastra di pietra arenaria del VI secolo a.C., che pesa 250 chilogrammi, è alta più di un metro e faceva parte di un tempio di 2500 anni fa che venne demolito per costruirne uno di maggiori dimensioni. Il reperto ha grande importanza perché reca iscritto sulla superficie un testo in lingua etrusca, probabilmente sacro, che può far luce sulle prime credenze di questa civiltà e, contestualmente, consentire progressi significativi nello studio della relativa epigrafia. Rendere decifrabili i numerosi grafemi, dallo spessore sub-millimetrico, iscritti sulla superficie della Stele, ha costituito la principale fonte d'indagine verso la quale è stata sperimentalmente orientata e condotta l'intera procedura documentativa di rilievo 3D.

La sfida di fornire una rappresentazione digitale, ad alta definizione, delle iscrizioni è stata risolta con un progetto di rilievo che ha documentato costantemente lo *status* del-

la Stele durante tutte le operazioni di restauro conservativo, in collaborazione con la Soprintendenza Archeologia della Toscana che ne ha eseguito le fasi di pulitura.

Il progetto di documentazione, scegliendo di rilevare sperimentalmente l'oggetto della ricerca tramite la fotogrammetria digitale e sistemi laser a triangolazione, opportunamente applicati per ottenere risposte che avevano l'obiettivo di leggere e trasmettere ad altri studiosi più dati possibili, si è concretizzato nella produzione di *output* 3D finali in grado di soddisfare sia le esigenze della ricerca scientifica che requisiti di musealizzazione virtuale per una sua più ampia diffusione.

L'agevole visualizzazione e l'esplorazione del modello 3D ad alta risoluzione in ambiente virtuale, permettono di ricavare direttamente dalla sua geometria i segni iscritti sulla superficie accuratamente ricostruita.

Dunque la tesi, articolata in sette capitoli, si è posta principalmente due obiettivi: definire le potenzialità dei sensori ottici 3D non invasivi nell'ambito dei Beni archeologici e valorizzare l'interdisciplinarietà come linea guida dell'approccio di studio che permette di rappresentare, documentare e leggere i reperti

Modern processes for understanding material culture are intrinsically an important component of cultural management where an efficient synergy between archaeologists and architects can play a major role. The origins of this project are based on the interdisciplinary relationship that was part of close collaboration with the *Mugello Valley Archaeological Project* – a consortium of American and European universities – which coalesced as the result of extraordinary find by the excavations of Poggio Colla, in the Comune of Vicchio. This find, an inscribed stele, became the focal point of this thesis. The stele is a large sandstone slab that dates to the 6th century BC. It weighs 250 kilograms, is well over a metre high, and was placed in the foundations of a temple. The stele is especially important because its surface is inscribed with a long Etruscan text, probably sacred in nature, which promises to shed light on the Etruscan belief system as well as to provide important evidence for Etruscan language and epigraphy. The principal research goal was to render decipherable through experimental methods, based on 3D digital documentation, the numerous incisions, some of which are now barely even a millimetre deep.

The challenge of providing a high-definition digital representation of the inscriptions was resolved by the repeated documentation of the stele during all parts of the conservation process, thanks to the collaboration of the Soprintendenza Archeologia della Toscana, which supervised the process of restoration. The experimental methodology that was chosen for documentation was digital photogrammetry and triangulation-based laser scanning. These techniques, carefully applied with the goal of documenting and eventually communicating to other researchers the maximum amount of data, resulted in a 3D model that was designed satisfy research needs that require virtual display for a broader audience. The easy visualization and exploration of the high-resolution 3D model will allow re-

searchers to directly retrieve the inscribed letters and signs from a surface that is accurately reconstructed.

This thesis, articulated in seven chapters, has two goals: defining the capabilities of noninvasive 3-D optical sensors for archaeological purposes and setting forth the value of interdisciplinary approaches that permit the representation, documentation, and interpretation of archaeological evidence.