



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DOTTORATO DI RICERCA IN
SCIENZA PER LA CONSERVAZIONE DEI BENI CULTURALI
CICLO XXVI

COORDINATORE Prof. Baglioni Piero

**MICRO-FOTOGRAMMETRIA PER IL MONITORAGGIO
DELLO STATO DI CONSERVAZIONE E LA
DOCUMENTAZIONE DEI BENI CULTURALI**

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/19

Dottorando

Arch. Manganelli Del Fà
Rachele

Tutore

Prof. Frediani Piero

Co-Tutore

Prof.ssa Grazia Tucci

Coordinatore

Prof. Baglioni Piero

Anni 2011/2013

“ Architetto. Persona che disegna un progetto della vostra casa e progetta disegni sul vostro denaro.”

Ambrose Bierce, Dizionario del diavolo, 1911

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. LO STATO DELL'ARTE	3
2. IL METODO MICRO-FOTOGRAMMETRICO	11
2.1. Hardware e Software	13
2.2. Acquisizione delle immagini	16
2.3. Elaborazione delle immagini e generazione del modello 3D	19
2.4. Registrazione e analisi dei modelli	23
3. VALIDAZIONE DEL METODO	26
3.1. Prestazioni dell'hardware	29
3.1.1. Macchina fotografica Canon EOS 400D	29
3.1.2. Macchina fotografica Canon EOS 7D	39
3.2. Valutazione dell'errore	54
4. APPLICAZIONI	70
4.1. Applicazione a fini diagnostici	70
4.1.1. La micro-fotogrammetria per la valutazione di interventi di pulitura	71
4.1.2. La micro-fotogrammetria per il monitoraggio di lesioni	83
4.2. Applicazioni a fini documentativi	98

4.2.1. Busto policromo di Ugolino Martelli	100
4.2.2. Documentazione di reperti archeologici	114
5. CONCLUSIONI	121
BIBLIOGRAFIA	125

Introduzione

La fotogrammetria è la tecnica che utilizza immagini fotografiche di un oggetto per ricavarne informazioni dimensionali e le sue origini sono antiche almeno quanto l'invenzione della fotografia.

Sebbene nasca per il rilievo delle architetture, si è maggiormente sviluppata nel rilevamento del territorio, in particolare come *fotogrammetria aerea* per la redazione di prodotti cartografici, e nell'ambito dell'industria meccanica e aeronautica.

Lo sviluppo della fotogrammetria, nei suoi principi teorici, è strettamente legato a quello della geometria descrittiva, ed in particolare alla teoria della prospettiva, e per quanto riguarda i suoi principi applicativi allo sviluppo dell'ottica e della fotografia¹.

Ne consegue che per una corretta applicazione di questa disciplina, si è dovuto attendere lo sviluppo delle conoscenze necessarie sia in campo fotografico che in quello della geometria descrittiva, sia nell'integrazione delle due discipline.

L'avvento della fotografia digitale ha reso possibile un approccio allargato alla disciplina fotogrammetrica, mettendo a disposizione

¹ La fotografia, da un punto di vista ottico-proiettivo, può essere assimilata ad una proiezione centrale; infatti tutti i raggi provenienti dall'esterno vengono convogliati attraverso le lenti dell'obiettivo ad un punto (o assimilabile a tale) e proiettati su uno schermo (lastra, pellicola, sensore) che li intercetta. Pertanto la fotografia può essere assimilata, con una buona approssimazione, ad una vista prospettica della realtà.

software che permettono di estrarre informazioni metriche dalla fotografia, semplificando di molto le procedure di ricostruzione e permettendo l'utilizzo di tecnologie a basso costo.

La vasta gamma di sensori e tecnologie che permettono di derivare informazioni metriche 2D e 3D, ha favorito l'utilizzo di queste nuove tecnologie anche nel campo dei Beni Culturali, soprattutto in ambito architettonico e archeologico, per la documentazione, conservazione e rappresentazione, spesso combinate a sistemi di rilievo laser-scanner [1], [2].

Tra i sistemi che utilizzano la fotografia digitale per la restituzione di modelli tridimensionali, si vuole qui presentare il sistema microfotogrammetrico per il monitoraggio e la documentazione dei Beni Culturali.

Il seguente lavoro intende illustrare innanzi tutto il funzionamento del sistema, sia nella sua componente *hardware* che *software*, valutarlo in termini di accuratezza e precisione ed infine presentare alcune delle sue applicazioni sia nell'ambito del monitoraggio che della documentazione dei Beni Culturali.

1. Stato dell'Arte

Le nuove tecnologie di fotografia digitale hanno contribuito ad una forte diffusione della fotogrammetria monoscopica², meno rigorosa e affidabile della fotogrammetria stereoscopica³, ma basata su procedure più semplici e rapide e alla portata di tutti.

Il metodo fotogrammetrico è molto versatile e applicabile per la acquisizione di dati 3D di oggetti e superfici di grandezze diverse; per l'individuazione dei punti si utilizza il principio della triangolazione, determinando, per un certo numero di questi (punti omologhi⁴), l'intersezione dei raggi omologhi, cioè le semirette che partendo dal punto immagine passano per il centro dell'obiettivo della camera. L'individuazione delle tre dimensioni del punto (x, y, z) avviene tramite un *set* di fotografie orientate secondo un sistema di riferimento. Infatti se un oggetto viene ripreso con almeno due immagini scattate da punti di vista diversi, di cui si conosce la posizione, la diversa dislocazione dello stesso nei due fotogrammi permette di ottenere una vista stereoscopica e quindi derivare

² La fotogrammetria monoscopica consiste nel raddrizzamento dei singoli fotogrammi da cui si ricava una proiezione ortogonale di tipo bidimensionale, parallela alla superficie inquadrata.

³ La fotogrammetria stereoscopica implica che un oggetto venga fotografato da due punti diversi in modo da ricavarne una visione tridimensionale.

⁴ Si definiscono "punti omologhi" quei punti che possono essere riconosciuti su due o più immagini della stessa area.

informazioni tridimensionali dalle aree di sovrapposizione delle immagini.

È da tenersi in considerazione il fatto che, per bene identificare i dettagli di una superficie, è necessario che questa abbia una elevata “differenziazione” (ad esempio la presenza di decori e sottosquadri nel rilievo architettonico), quando questo principio viene meno (ad esempio in caso di superfici completamente intonacate ed omogenee) non è possibile identificare in maniera chiara l’oggetto.

Altri fattori che possono influenzare negativamente il rilievo fotogrammetrico sono: la presenza di ombre sull’oggetto, occlusioni (ad esempio alberi, cartelli stradali, ecc.), materiali riflettenti o trasparenti.

La versatilità della tecnica fotogrammetrica ha fatto sì che fosse applicata in campi diversi: dallo studio e rilievo di grandi strutture in ingegneria civile, nel settore della conservazione dei Beni Culturali (per rilievi architettonici e ambientali), ma anche in settori strettamente industriali come lo studio delle deformazioni di pezzi meccanici sottoposti a *stress* o per il rilievo geometrico di precisione in applicazioni meccaniche e aeronautiche.

Gli elevati costi delle strumentazioni e la laboriosità della restituzione dei dati, hanno fatto sì che lo sviluppo di questa tecnica fosse limitato a quei settori in cui le risorse economiche fossero più facilmente reperibili.

Come precedentemente detto, il passaggio dalla fotogrammetria analitica a quelle digitale, con l'abbattimento dei costi della strumentazione e la possibilità di svincolarsi da punti topografici di appoggio offerta dai nuovi *software* fotogrammetrici oggi in commercio, ha favorito lo sviluppo e la diffusione di questa tecnica anche nell'ambito dei Beni Culturali, non solo per il rilievo architettonico.

L'introduzione di nuove tecniche di elaborazione delle immagini, hanno radicalmente trasformato l'approccio al rilevamento fotogrammetrico, il cui sviluppo consiste nell'evoluzione di *software* in grado di gestire la restituzione del modello tridimensionale dalle fotografie in maniera semi automatica, utilizzando le strumentazioni già disponibili.

Per le specifiche applicazioni che ne vengono fatte, la metodologia può essere suddivisa in:

- **fotogrammetria area**, quando la macchina da presa si trova a bordo di un mezzo aereo e l'oggetto inquadrato è il territorio;
- **fotogrammetria terrestre**, quando la macchina fotografica è posizionata a terra e gli oggetti rilevati sono architetture o parti di esse.

È prassi consolidata identificare come *fotogrammetria dei vicini*, o *Close-Range Photogrammetry*, il rilievo fotogrammetrico di oggetti posti a una distanza inferiore a 300 m dalla camera, e come *fotogrammetria dei lontani* il rilievo di oggetti posti a distanze maggiori di 300 m.

Nell'ingegneria meccanica la *Close-Range Photogrammetry* è utilizzata per il dimensionamento, senza contatto, di oggetti compresi tra i 10^{-3} e i 10^2 m², in particolare per oggetti visibili ma dei quali si vuole evitare il contatto (ad esempio pezzi contaminati o molto fragili) o che hanno geometrie complesse (ad esempio nel caso di incidenti d'auto).

Quando le dimensioni dell'area risultano essere minori di 10^{-3} m², si parla di *Very* o *Ultra-Close-Range Photogrammetry*. Indipendentemente dalle dimensioni misurate, il processo fotogrammetrico è lo stesso, e permette di ricostruire tridimensionalmente l'oggetto da una serie di due o più fotografie scattate da diversi punti di vista, di coordinate note, intorno all'oggetto.

Anche se la distanza di ripresa varia, tutte le metodologie e i sistemi si basano sul processo fotogrammetrico tradizionale, che si svolge in tre fasi:

- 1) acquisizione/registrazione delle immagini;
- 2) orientamento delle immagini e ricostruzione del modello tridimensionale attraverso tecniche stereoscopiche;
- 3) restituzione, cioè misura dell'oggetto e rappresentazione numerica o grafica delle sue caratteristiche dimensionali.

In base alla forma di rappresentazione del dato, e quindi degli strumenti utilizzati per la restituzione, si distingue tra:

- fotogrammetria tradizionale se l'immagine disponibile è su supporto fotografico;
- fotogrammetria digitale se l'immagine è registrata in forma digitale.

La ricostruzione del modello passa storicamente attraverso due approcci:

- analogico, in cui l'azione fisica di componenti ottici, meccanici ed elettronici è volta a ricostruire le corrispondenze geometriche (sistema ormai superato);
- analitico, in cui la ricostruzione è affidata alla elaborazione matematica delle immagini acquisite in formato digitale.

I prodotti che il procedimento fotogrammetrico è in grado di generare sono di due tipi:

- *prodotti immagine*, derivati da immagini originali per trasformazioni geometriche più o meno complesse:
 - raddrizzamento di immagini o fotopiano: procedimento applicabile solo ad oggetti perfettamente piani o con variazioni altimetriche (profondità) tali da generare errori trascurabili alla scala di rappresentazione scelta;
 - ortofoto: attraverso un modello geometrico tridimensionale l'immagine viene geometricamente corretta, passando dalla prospettiva di acquisizione ad una proiezione ortogonale in modo che la scala sia uniforme;
 - mosaici: accorpamenti di immagini singole raddrizzate o ortorettificate per realizzare una copertura unitaria dell'area di interesse;

- *prodotti numerici puntuali o vettoriali*, in cui la restituzione passa attraverso la determinazione di punti oggetto in un sistema di riferimento tridimensionale:

- cartografie: carte topografiche planimetriche corredate con informazioni altimetriche (punti quotati o curve di livello);
- disegni architettonici vettoriali in proiezione ortogonale (principalmente in alzato);
- profili (rispetto ad un piano orizzontale o verticale di riferimento).

Affinché la misurazione fotogrammetrica abbia successo, sono necessari punti di riferimento, *targeting*, ciascuno dei quali deve risultare visibile in due o più fotografie, tali punti possono essere anche artificiali (cioè *target* apposti sulla superficie), o caratteristici della superficie (per esempio nella fotogrammetria architettonica punti legati alle caratteristiche geometriche come finestre, decori, ecc.).

In fotogrammetria specifici *software* di elaborazione di immagini, permettono il calcolo della posizione tridimensionale di ciascun *target* sulla base delle sue coordinate bidimensionali sulla foto attraverso il principio della triangolazione; mentre i calcoli di triangolazione possono essere eseguiti utilizzando le informazioni provenienti da solo due immagini, l'uso di ulteriori immagini permette il calcolo automatico degli stessi da parte del *software*.

I recenti sviluppi dell'elettronica hanno permesso la progettazione di nuovi sensori digitali per le macchine fotografiche, questi, insieme

allo sviluppo di nuovi algoritmi di *image matching*⁵ [3], [4], permettono di ottenere modelli tridimensionali di superfici, oggetti e architetture in maniera quasi del tutto automatica con elevata accuratezza. Quest'ultima é strettamente legata a fattori quali la grandezza del *pixel* dell'immagine fotografica, la scala della stessa e la distanza della camera dall'oggetto.

Un metodo particolare nel settore dell'acquisizione e rielaborazione delle immagini è quello micro-fotogrammetrio, il metodo può essere collocato tra le tecniche fotogrammetriche dei vicini (*Close-Range Photogrammetry*), ma per le dimensioni dell'area rilevata e per l'utilizzo di un obiettivo macro, molto si avvicina alle tecniche fotogrammetriche e macrofotografiche utilizzate in ambito industriale per lo studio delle deformazioni e la prototipazione di pezzi meccanici [5]-[7].

⁵ Gli algoritmi che eseguono procedure d'*image matching* sono tutti quegli algoritmi che cercano la posizione di un determinato oggetto, individuato in una fotografia, all'interno di una seconda immagine.

2. Il metodo micro-fotogrammetrico

La fotogrammetria digitale è basata sull'acquisizione di immagini fotografiche digitali al fine di ottenere informazioni metriche dell'oggetto della ripresa, come ad esempio di un edificio, o di un'area geografica più o meno estesa, in particolare per la produzione di mappe topografiche (fotogrammetria aerea).

La fotogrammetria, ad oggi, è frequentemente utilizzata nel campo dei Beni Culturali per la documentazione di manufatti artistici, superfici architettoniche, e siti archeologici.

La documentazione ottenuta con tecniche fotogrammetriche non solo fornisce modelli facilmente misurabili, ma consente di evidenziare le trasformazioni dimensionali subite nel corso del tempo dall'oggetto a causa di fenomeni esogeni e processi fisico-chimici più o meno spontanei [8]-[18].

Il metodo micro-fotogrammetrico, derivato dai principi della fotogrammetria classica, permette di generare un modello 3D misurabile, di piccole porzioni di superficie, o di manufatti di dimensioni limitate, mediante la sovrapposizione di immagini digitali acquisite da un sistema fotografico.

Il sistema micro-fotogrammetrico [19], totalmente non invasivo, descritto di seguito, è stato messo a punto presso l'Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali (ICVBC-CNR) per la valutazione dello stato di conservazione e per il monitoraggio di

superfici di particolare interesse storico-artistico, al fine di evidenziarne alterazioni geometriche e colorimetriche indotte sia da fenomeni naturali, variazioni climatiche dell'ambiente, sia da trattamenti conservativi e/o interventi di restauro.

2.1 Hardware & Software

La tecnica micro-fotogrammetrica, messa a punto dall'ICVBC di Firenze in collaborazione con la ditta *Menci Software*[®] di Arezzo, permette di ottenere una nuvola di punti RGB acquisendo tre immagini digitali (definite "tripletta"), riprese da angolazioni diverse, della stessa porzione di superficie utilizzando una comune macchina digitale reflex precedentemente calibrata.



Figura 1: il sistema micro-fotogrammetrico

Il sistema (*Figura 1*) è costituito da una barra motorizzata lunga 260 mm, lungo la quale, opportunamente fissata a ad una slitta mobile, scorre una macchina fotografica digitale reflex Canon 7D equipaggiata con obiettivo

macro Canon EFS 60 mm; un programma dedicato di acquisizione, *ZScan Micro*[®], gestisce il collegamento, da remoto, tra la camera e la barra motorizzata (posizionamento della camera digitale lungo la barra e controllo dell'acquisizione).

Individuata l'area di indagine, il programma permette di effettuare una valutazione automatica della distanza tra il sensore della camera

e l'area di acquisizione, suggerendo l'opportuna distanza (*step*) tra due punti di acquisizione successivi dell'immagine, "scatti".

Impostate le caratteristiche di ripresa, vengono realizzate tre acquisizioni dell'area interessata, da sinistra e destra, e simmetriche rispetto all'acquisizione centrale; le immagini così acquisite sono esportate per poter essere successivamente elaborate all'interno di un *software* specifico, *ZScan*[®].

Al modello generato può essere associata una *texture* che permette una chiara lettura delle informazioni relative al colore, e alle caratteristiche di rugosità superficiale dell'area indagata (stato di conservazione).

La scelta di utilizzare dispositivi commerciali di acquisizione delle immagini (macchina fotografica), permette l'utilizzo di obiettivi di lunghezza focale diversa⁶; l'impiego di un obiettivo da 28 mm, ad esempio, permette la ricostruzione di aree più grandi, che possono essere a loro volta mosaicate all'interno di un unico modello.

Dopo la fase di acquisizione ed elaborazione, un ulteriore *software*, *Zmap*[®], permette l'analisi dei modelli ottenuti: individuato un piano di riferimento (UCS - *User Coordinate System*) attraverso una semina di punti sulla superficie, viene generato il DEM (*Digital Elevation Model*) ovvero la rappresentazione cromo-altimetrica *raster* della

⁶ In una lente convergente i raggi provenienti da un soggetto molto lontano (infinito) convergono in un unico punto. La distanza tra il centro della lente e il piano focale (piano su cui si forma l'immagine del soggetto) è la lunghezza focale (o focale) di quella lente.

distribuzione delle quote di una superficie, relativamente all' UCS corrente.

Generato il DEM, il programma, permette di effettuare una valutazione automatica delle quote massime e minime del *pattern* superficiale, rappresentate in una scala cromatica che va, rispettivamente, dal rosso al blu.

Il programma *Zmap*[®] permette inoltre la sovrapposizione delle aree acquisite: ad esempio è possibile inserire un'area indagata con l'obiettivo macro da 60 mm su un'area più ampia acquisita con l'obiettivo da 28 mm, oppure sovrapporre la stessa zona acquisita in tempi diversi, ad esempio prima o dopo un trattamento di pulitura, o prima e dopo un trattamento di conservazione o di restauro.

Scelta poi una direzione sull'area di indagine, è possibile generare dei profili della superficie, le coordinate di tali profili possono essere facilmente esportate in formato testo e gestite con qualsiasi *software* che consenta una loro rappresentazione grafica.

2.2 Acquisizione delle immagini

Il software *ZScan Micro*[®] gestisce da remoto il collegamento tra la camera e la barra motorizzata permettendo il posizionamento della camera sulla barra ed il controllo dell'acquisizione delle immagini.

Inquadrata l'area di interesse è possibile valutare automaticamente la distanza della superficie dal sensore della camera (la distanza di lavoro tipica di *ZScan Micro*[®] è compresa in un *range* tra 230 - 360 mm), il programma propone in automatico lo *step* di acquisizione delle immagini, ovvero la distanza tra gli scatti.

In fotogrammetria la distanza tra i punti di ripresa, detta base, è di circa 1/10 della distanza dall'oggetto fotografato, *ZScan Micro*[®] lavora riferendosi alla stessa proporzione: ad esempio, se ci troviamo ad una distanza di circa 320 mm dalla superficie, la base ottimale di scatto (*baseline*) sarà di 32 mm, per cui la distanza tra gli scatti risulterà essere 16 mm.

Ovviamente tale distanza non è assoluta, e può essere cambiata in funzione della superficie che deve essere acquisita, ad esempio in presenza di una superficie molto "scabrosa" sarà opportuno aumentare lo *step* di acquisizione per poter meglio descrivere le aree convesse.

L'utilizzo di un obiettivo macro riduce di molto la profondità di campo, questa è infatti influenzata dalla lunghezza focale: più è elevata la lunghezza focale, minore sarà la profondità di campo.

Un obiettivo può mettere a fuoco esclusivamente su un determinato piano (piano focale), tutto ciò che si trova sul piano di messa a fuoco apparirà nitido, mentre tutto ciò che si trova dietro e davanti il piano di messa a fuoco apparirà sfocato, ossia poco nitido.

In pratica però, davanti e dietro il piano di messa a fuoco vi è un certo intervallo in cui la sfocatura è talmente contenuta da essere impercettibile, questo intervallo è chiamato profondità di campo.

Nel caso specifico dell'obiettivo 60 mm Canon si può lavorare in un *range* di profondità di circa ± 2 cm dal piano focale. Inoltre lavorando a distanze molto ravvicinate la profondità di campo risulta ulteriormente ridotta e per questo motivo si tende ad acquisire le immagini con diaframmi molto chiusi (da f/13 in su).

La chiusura del diaframma fa aumentare la profondità di campo: più il diaframma è chiuso, infatti, più i raggi che colpiscono il sensore saranno perpendicolari ad esso, contribuendo a una maggior nitidezza dell'immagine.

La messa a fuoco viene valutata automaticamente sulla posizione centrale della strisciata e poi fissata manualmente per non incorrere in differenze di messa a fuoco tra una acquisizione e le successive.

Impostate quindi le caratteristiche di scatto (*step* di ripresa, apertura del diaframma, ecc) è possibile acquisire le immagini: il sistema realizza tre acquisizioni da sinistra e destra e simmetrici rispetto allo scatto centrale (*Figura 2*).

Le immagini così acquisite vengono poi esportate per poter generare il modello 3D.



Figura 2: la tripletta di immagini acquisita dalla camera

2.3 Elaborazione delle immagini e generazione del modello 3D

Le immagini acquisite vengono esportate all'interno del *software ZScan*[®], che permette di generare le nuvole di punti RGB che costituiranno il modello tridimensionale della superficie.

Tale processo di elaborazione si basa su quattro diverse operazioni (*Figura 3*):

1. Rettifica dell'immagine per eliminare le distorsioni geometriche ed ottiche;
2. Selezione dell'area di interesse;
3. Definizione del valore di risoluzione;
4. Generazione del modello tridimensionale a nuvola di punti.



Figura 3: il processo di elaborazione delle immagini, da sinistra a destra: rettifica dell'immagine, selezione dell'area di interesse, generazione del modello

La rettifica dell'immagine permette di eliminare le distorsioni ottiche dell'obiettivo, queste sono costituite dalla distorsione radiale, a barilotto o a cuscinetto dal centro verso i bordi dell'immagine, e

tangenziale, ortogonale a quella radiale e caratterizzata da un ordine di grandezza inferiore.

Per eliminare tali distorsioni, il sistema usa un *remapping* dell'immagine, ovvero una trasformazione *pixel a pixel* che conduce ad un'immagine corretta dai difetti sopracitati, tale trasformazione è ottenuta mediante i dati contenuti nel certificato di calibrazione della camera abbinata alla relativa ottica.

Terminata le procedure di rettifica delle immagini, è possibile selezionare l'AOI (*Area of Interest*), cioè l'area (o le aree) dell'immagine da utilizzare per la generazione del modello 3D.

In fase di generazione del modello 3D, il *software* permettere di impostare la risoluzione del modello, ovvero quanti *pixel* dell'immagine fotografica saranno utilizzati dal *software* per ricostruire un punto tridimensionale del modello.

In generale se si imposta un valore di campionamento basso si ottengono nuvole di punti “dense”, ma anche estremamente pesanti e quindi difficili da gestire in termini di dimensione dei file generati; inoltre la possibilità di associare alle nuvole di punti una *texture* fotografica permette una chiara lettura della superficie senza dover generare nuvole troppo dense.

Al fine di creare una *texture* omogenea è definito il parametro GSD (*Ground Simple Distance*) legato alla scelta della risoluzione del modello. Il GSD è definito come la distanza media tra i punti 3D della nuvola, ed è espresso nella stessa unità di misura della *baseline* (in

mm). Il valore del GSD è legato a fattori diversi, quali la risoluzione della camera utilizzata, l'ottica impiegata e la distanza di presa.

Dopo la fase di orientamento delle immagini (*bundle*) si stabilisce una relazione metrica tra i valori in pixel e quelli espressi nell'unità di misura della *baseline*. Una volta che le immagini sono state rettificate, cioè eliminate le distorsioni geometriche legate all'ottica, e determinata la posizione nello spazio di ciascuna immagine (posizione della camera lungo la barra), è possibile dire, con una certa approssimazione, che ogni *pixel* rappresentato misura una certa quantità nello spazio: questa quantità è il GSD.

Aumentando il numero di *pixel* dell'immagine, diminuisce il relativo valore del GSD, allo stesso modo se la camera viene avvicinata al soggetto (fino a che è possibile la messa a fuoco), o se si utilizza un'ottica "più tele"⁷, a parità di *pixel* la dimensione della superficie ripresa risulta minore, e dunque anche il valore del GSD.

Il valore del GSD, moltiplicato per 10, può essere utilizzato per definire il *fattore Alpha* della triangolazione durante la fase di generazione del modello. La triangolazione è necessaria per passare dalla nuvola di punti ad una superficie (*mesh*) che potrà poi essere texturizzata.

⁷ In funzione della lunghezza focale, gli obiettivi vengono classificati nel seguente modo: *Grandangolari*, obiettivi con lunghezza focale pari a 35, 28 e 20 mm, *Normali*, per obiettivi di lunghezza focale compresa tra 50 e 55 mm, *Tele* per focali superiori ai 55 mm. Tra questi ultimi si possono distinguere: *Tele Moderati* (lunghezza focale compresa tra 70 e 100 mm), *Tele Medi* (lunghezza focale compresa tra 135 e 200 mm) e *Tele spinti* (lunghezza focale 300, 500 e 1000 mm).

La deduzione del valore del *fattore Alpha* è empirica: moltiplicando per dieci il valore del GSD, si considera che l'eventuale "discontinuità" di una superficie maggiore di dieci volte la risoluzione del modello sia considerato un "buco" a tutti gli effetti, dunque moltiplicando per dieci il valore del GSD si evita la creazione di superfici inesistenti.

Rimane la possibilità di variare il *fattore Alpha* in considerazione della eterogeneità della superficie e del soggetto in fase di studio. Infatti è possibile personalizzare l'aspetto finale della superficie, imponendo che non siano ricostruiti triangoli oltre quella dimensione (diametro del cerchio circoscritto al triangolo).

In funzione del soggetto, della condizione di ripresa e di illuminazione, si possono ottenere nuvole di punti "rumorose" (con punti sporchi, *spike*), rade, fitte o bucate, queste disomogeneità influiscono sulla triangolazione e dunque sulla *mesh* finale.

Impostate dunque le caratteristiche generali, viene generato automaticamente il modello 3D dell'area selezionata; il modello non viene scalato ma ricostruito in scala 1:1 con unità di misura uguale a quella impostata in fase di generazione. Per fare questo ci si avvale della conoscenza esatta del punto di presa e degli angoli di ciascuno scatto, la barra motorizzata, attraverso un motore passo-passo, permette di conoscere questi valori esattamente al momento dell'acquisizione.

2.4 Registrazione e analisi dei modelli

Il programma *ZMap*[®] permette la gestione dei modelli generati e la loro analisi. I modelli vengono importati all'interno del programma e allineati tra loro, ad esempio nel caso in cui si siano dovuti generare più modelli per descrivere una superficie più ampia, o nel caso in cui si volessero "registrare" aree di dettaglio, acquisite con l'obiettivo da 60 mm, su una superficie più ampia acquisita con un obiettivo da 28 mm.

Per la registrazione dei modelli si procede alla ricerca dei punti omologhi: viene aperta una finestra di dialogo in cui sono visualizzati i modelli da allineare, su ciascuno di essi si ricercano i punti omologhi (in numero minimo di 5) cercando di selezionarli uniformemente distribuiti sull'intera superficie del modello (*Figura 4*).

Una volta terminato il processo di riconoscimento dei punti, i modelli vengono rototraslati uno sull'altro per essere allineati; laddove non siano presenti punti facilmente riconoscibili per la sovrapposizione, ad esempio per superfici uniformi dal punto di vista del colore ed omogenee dal punto di vista della rugosità, è opportuno, durante la fase di acquisizione delle immagini, apporre dei *marker* sulla superficie per facilitare le operazioni di sovrapposizione.

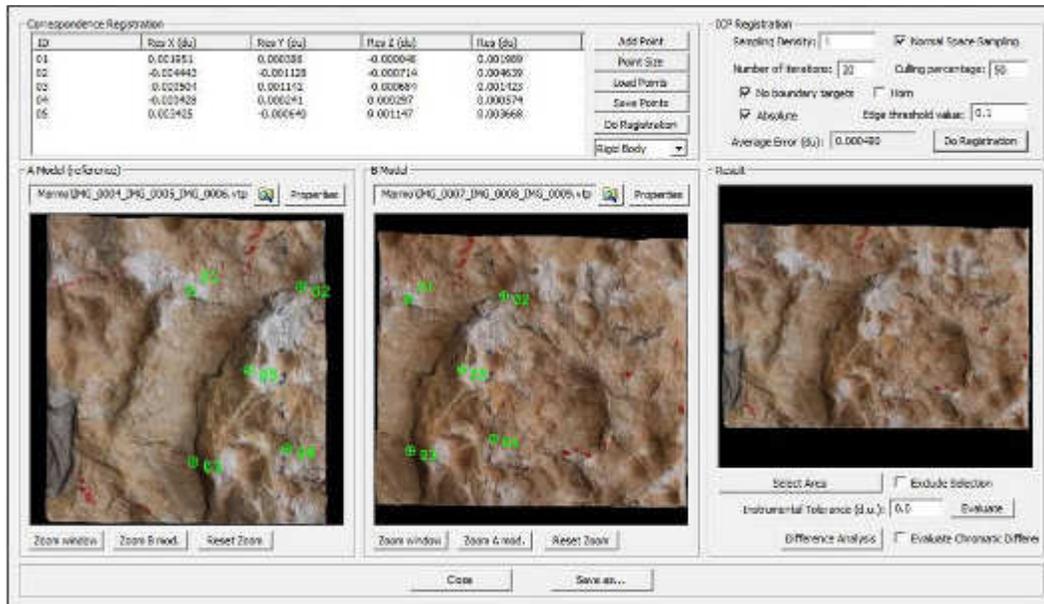


Figura 4: ricerca dei punti omologhi per la registrazione dei modelli

Una volta allineati i modelli si passa alla fase di analisi delle superfici: per poter fare questo si deve inizialmente determinare un UCS (*User Coordinate System*) attraverso una “semina” di punti sulla superficie del modello, quindi il programma provvede, in automatico, a generare un piano passante per i punti selezionati.

Tutti i modelli inseriti all’interno del progetto saranno riferiti a questo UCS in modo da poterli confrontare tra loro, sempre rispetto a questo piano saranno generati i DEM (*Digital Elevation Model*) ovvero la rappresentazione cromo-altimetrica *raster* della distribuzione delle quote sulla superficie, in una scala di colori che va rispettivamente dal rosso al blu.

La determinazione del DEM è necessaria per poter tracciare profili di rugosità superficiale: individuata sulla superficie una direzione è

possibile determinare il profilo della superficie ed i valori ottenuti possono essere esportati in formato testo (*Figura 5*).

Il programma *ZMap*[®] permette inoltre di produrre un'analisi comparativa tra due superfici (ad esempio “tempo zero” e “tempo uno” di una superficie, cioè prima e dopo un trattamento), fornendo i DEM dei singoli modelli, la distribuzione delle frequenze delle quote della superficie investigata, il DEM “differenza” tra i due modelli, e dunque la distribuzione delle frequenze della differenza delle quote tra due riprese.

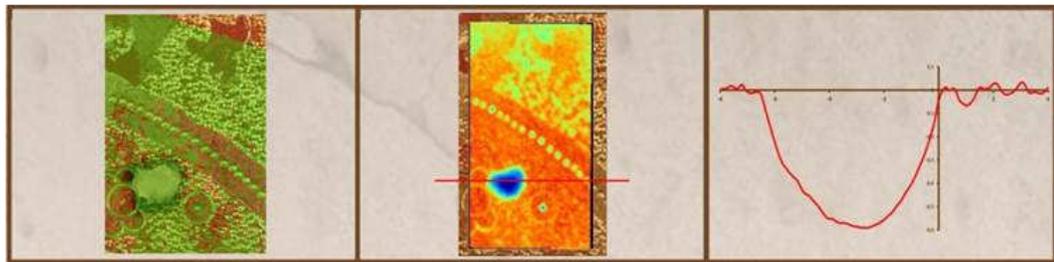


Figura 5: da sinistra a destra, individuazione dell'UCS, generazione del DEM e il profilo della superficie secondo la direzione scelta

3. Validazione del metodo

Obiettivo dei *test* è stato quello di stabilire l'accuratezza delle dimensioni misurate con questo metodo, cioè la massima precisione ottenibile in termini metrici sui modelli 3D generati dal sistema. Tutte le elaborazioni e le analisi che verranno successivamente eseguite, avranno come limite tale precisione. La stima della precisione in profondità (ovvero rispetto alle quote dei singoli punti tridimensionali) è sicuramente più critica rispetto alle corrispondenti misure planimetriche e dunque può essere considerata come limite superiore alle altre precisioni.

Al fine di valutare il grado di precisione del sistema microfotogrammetrico, presso i nostri laboratori, sono state approntate una serie di sperimentazioni su blocchetti di riferimento a piani paralleli Borletti⁸ di spessore di 1.0, 1.5 e 2.0 mm, realizzati in lega di acciaio di elevata durezza (non inferiore a 800 HV), con basso coefficiente di dilatazione lineare ed elevata resistenza all'usura. La precisione dei blocchetti è certificata dalla ditta fornitrice secondo le norme DIN 861 ISO 3650, grado 0, specifico per controlli di alta precisione quali misure campione per sale metrologiche (tolleranza $\pm 0,12 \mu\text{m}$).

⁸ http://arc-bg.com/catalogues/Cataloghi/02_Borletti.pdf (ultimo accesso 14/12/2013)

<http://www.ltf.it/prodotti.php?b=2&c=82&p=2990> (ultimo accesso 14/12/2013)

Su tali provini sono state eseguite delle misure di verifica con un comparatore millesimale⁹, i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 1. La deviazione standard riscontrata sul provino di spessore di 1.0 mm è pari a 0.945 μm , su quello di 1.5 mm è pari a 0.605 μm , infine su quello di spessore di 2.0 mm è pari a 0.447 μm .

Grossolanamente per spessori superiori a 1 mm, possiamo affermare che l'errore medio commesso con il comparatore è di 0.666 μm .

La validazione del metodo micro-fotogrammetrico si è sviluppata in due diverse fasi, durante le quali è stata cambiata la camera per l'acquisizione delle immagini (Canon EOS 400D e Canon EOS 7D), modificato il set-up di misura, e approfonditi quegli automatismi propri del sistema per verificarne la bontà e la loro influenza sul risultato finale.

Inoltre è stata messa a punto una speciale *routine* in *Matlab*[®], per migliorare ulteriormente le prestazioni del sistema e quindi i risultati ottenuti.

⁹ Mitutoyo,

Numero prova	Campione spessore 1000 μm	Campione spessore 1500 μm	Campione spessore 2000 μm
1	1001.3	1499.3	1999.3
2	1000.3	1500.3	1999.3
3	1001.3	1499.3	1999.3
4	1000.3	1499.3	1999.3
5	1001.3	1500.3	1999.3
6	1002.3	1499.3	2001.3
7	1001.3	1501.3	1999.3
8	1002.3	1500.3	1999.3
9	1002.3	1500.3	1999.3
10	1001.3	1500.3	1999.3
11	1001.3	1499.3	1999.3
12	1000.3	1499.3	1999.3
13	1000.3	1500.3	1999.3
14	1000.3	1500.3	1999.3
15	999.3	1499.3	1999.3
16	999.3	1499.3	1999.3
17	999.3	1499.3	1999.3
18	1000.3	1499.3	1999.3
19	1000.3	1499.3	1999.3
20	1000.3	1499.3	1999.3
Media [μm]	1000.783	1499.783	1999.433
Dev. st. [μm]	0.945	0.605	0.447

Tabella 1: Risultati misure comparatore millesimale. I risultati in tabella sono riportati in μm

3.1 Prestazioni dell'hardware

Il sistema micro-fotogrammetrico è costituito, per le sue componenti *hardware*, da una barra micrometrica motorizzata di lunghezza pari a 260 mm, e da una macchina fotografica digitale reflex equipaggiata con un obiettivo macro da 60 mm.

Durante i primi *test* effettuati per la validazione del metodo, è stata utilizzata una macchina fotografica digitale reflex Canon EOS 400D, successivamente, al fine di migliorare i risultati ottenuti, è stata utilizzata una macchina fotografica digitale reflex Canon EOS 7D.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti utilizzando le due diverse macchine fotografiche.

3.1.1 Macchina fotografica Canon EOS 400D

Durante la prima fase di validazione, per le acquisizioni delle immagini, è stata utilizzata una fotocamera digitale reflex Canon EOS 400D equipaggiata con un obiettivo macro Canon 60 mm.

I blocchetti di riferimento Borletti, di spessore 1.0, 1.5 e 2.0 mm sono stati poggiati su una superficie liscia e pulita, un blocchetto di alluminio, a sua volta posizionato sul piano di uno stativo fotografico, avendo cura di ridurre al minimo l'inclinazione dei blocchetti.

Data la ridotta profondità di campo dell'obiettivo utilizzato nei test, si è preferito evitare di verificare dislivelli superiori a 2.5 mm.

I blocchetti sono stati quindi posti l'uno sull'altro nella seguente configurazione: i blocchetti di spessore 1.5 mm e 1.0 mm, accostati tra loro, sono stati poggiati sulla base di alluminio, e il blocchetto di spessore 2.0 mm poggiato trasversalmente su quello da 1.5 mm (Figura 6).



Figura 6: posizionamento dei blocchetti di riscontro

La strumentazione è stata predisposta agganciando la slitta motorizzata allo stativo fotografico. La slitta è stata portata in posizione intermedia, 130 mm, e vi è stata fissata sopra la fotocamera in modo tale che risultasse posizionata zenitalmente rispetto ai blocchetti.

Particolare cura è stata posta nel mettere in bolla la slitta motorizzata rispetto al piano dello stativo, così da evitare differenze in quota tra un'immagine e l'altra delle triplette acquisite.

Il sistema micro-fotogrammetrico nasce per il rilevamento tridimensionale di superfici opache, quindi materiali come il vetro, i metalli e superfici levigate, possono rappresentare un problema durante la fase di acquisizione rendendo difficile la messa a fuoco dell'oggetto, l'acquisizione delle immagini e la successiva generazione del modello.

Inoltre il riflesso è un fenomeno ottico che incrementa il "rumore" (incertezza) nella ricostruzione 3D dell'immagine acquisita.

Per questioni di stabilità dimensionale è stato necessario utilizzare provini metallici, quindi riflettenti. Per evitare riflessi ed ombre è stata scelta un'illuminazione adeguata: due sorgenti alogene a fibre ottiche, contrapposte tra loro (*Figura 7*) in modo da diminuire il riflesso sulla superficie dei provini, inoltre tutte le altre fonti di luce diretta all'interno della stanza sono state oscurate.

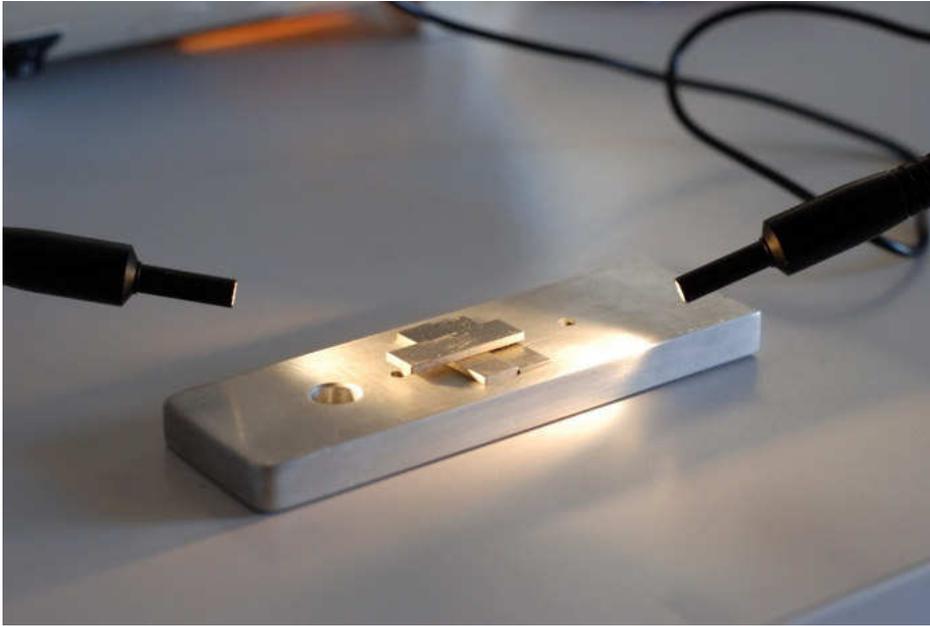


Figura 7: illuminazione dei blocchetti

La camera è stata posta in modalità AV (*Aperture Value*), in questa modalità è possibile impostare manualmente l'apertura del diaframma, mentre la velocità dell'otturatore viene impostata automaticamente in funzione della luminosità del soggetto.

Come detto precedentemente, l'utilizzo di un obiettivo macro riduce di molto la profondità di campo, questa è infatti influenzata dalla lunghezza focale: più è elevata la lunghezza focale, minore sarà la profondità di campo. Un obiettivo può mettere a fuoco esclusivamente su un determinato piano (detto piano focale), tutto ciò che si trova sul piano di messa a fuoco apparirà nitido, mentre tutto ciò che si trova dietro e davanti il piano di messa a fuoco apparirà sfocato, ossia poco nitido.

In pratica però, davanti e dietro il piano di messa a fuoco vi è un certo intervallo in cui la sfocatura è talmente contenuta da essere impercettibile, questo intervallo è chiamato *profondità di campo*.

Nel caso specifico dell'obiettivo 60 mm Canon, si può lavorare in un *range* di profondità di circa ± 2 cm dal piano focale, inoltre lavorando a distanze molto ravvicinate la profondità di campo risulta ulteriormente ridotta e per questo motivo si tende ad acquisire le immagini con diaframmi molto chiusi (da f/13 in su).

La chiusura del diaframma fa aumentare la profondità di campo: più il diaframma è chiuso, infatti, più i raggi che colpiscono il sensore saranno perpendicolari ad esso, contribuendo a una maggior nitidezza dell'immagine, nel caso specifico il diaframma è stato impostato con il valore di f/14.

Per quanto riguarda la velocità ISO (sensibilità alla luce del sensore immagine) è stato impostato un valore pari a 400, data la scarsa illuminazione.

Impostata così la fotocamera, i blocchetti sono stati acquisiti da distanze diverse: 230, 260, 300, 330, 360 e 400 mm, tra il sensore della camera e la superficie più alta dei blocchetti.

Per ogni acquisizione sono state ripetute le seguenti fasi:

- posizionamento della camera alla distanza voluta;
- messa a fuoco automatica della camera sul blocchetto più alto;

- disinserimento del fuoco automatico ed esecuzione della procedura di stima della distanza tra soggetto e camera per verifica (valutazione automatica della distanza blocchetto/sensore effettuata con *ZScanMicro*[®]);
- impostazione dello *step* di scatto uguale ad un ventesimo della distanza (es. 300 mm di distanza = 15 mm di *step* = 30 mm di base per la tripletta);
- acquisizione della tripletta di immagini.

Una volta acquisite le immagini, queste sono state esportate verso il *software* che gestisce la generazione dei modelli, utilizzando il certificato della camera impiegata.

Per ottenere uniformità nei risultati si è scelto di generare tutti i modelli con una risoluzione pari a 5 px, ovvero il sistema provvede a ricostruire un punto tridimensionale ogni 5 px dell'immagine fotografica.

Una volta generati, i modelli 3D sono stati importati nella finestra CAD per poterli analizzare; si è poi provveduto a definire il sistema di riferimento UCS (*User Coordinate System*), corrispondente alla superficie di messa a fuoco, ovvero il blocchetto più alto, attraverso una semina di punti sulla superficie (*Figura 8*).

Dopo la definizione del sistema di riferimento, è stato generato il DEM (*Digital Elevation Model*), relativo all'UCS scelto (*Figura 8*).

Sulle superfici dei blocchetti sono state disegnate delle polilinee necessarie al reperimento dei profili sui tre piani verificati, avendo cura di evitare le zone di bordo, più soggette ad incertezza nella ricostruzione. Rispetto alle polilinee tracciate sono stati generati i profili, le cui coordinate sono state poi esportate in formato testo. Per ciascuno dei profili generati sono stati presi a campione 30 vertici sulle cui Z (profondità) sono state calcolati i valori medi, il massimo, il minimo e la deviazione standard.

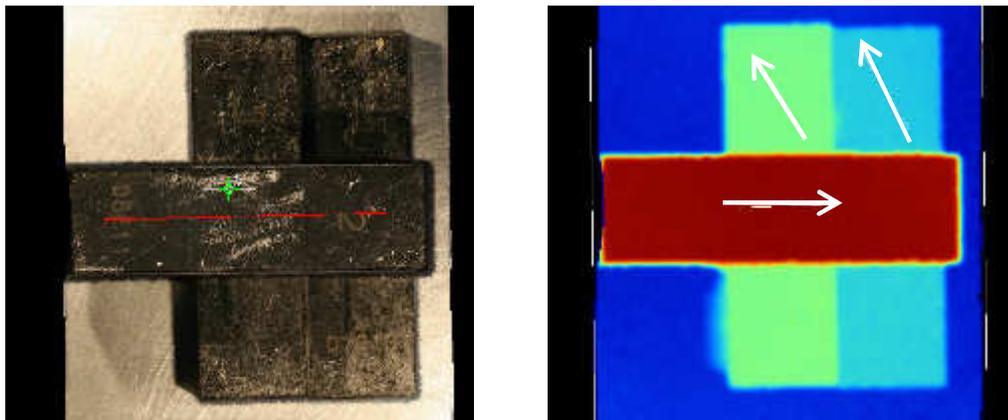


Figura 8: a sinistra la fase di individuazione dell'UCS, a destra il DEM con le polilinee per l'estrazione dei profili

Dai risultati ottenuti dalle elaborazioni effettuate sui profili estratti (*Tabella 2*) si può notare come lo Scarto Quadratico Medio (SQM) dei vari spessori di riferimento e la misura attesa, è sempre sotto i 5 centesimi di millimetro per le acquisizioni effettuate a una distanza di ripresa compresa tra i 300 e i 330 mm, per distanze maggiori il valore di SQM sale fino a 7 centesimi di millimetro.

Se le immagini vengono acquisite a distanze inferiori di 300 mm, lo scarto quadratico medio si abbassa fino ai 2 centesimi di millimetro; è da tenere in considerazione il fatto che, più cresce l'ingrandimento (ovvero più ci sia avvicina al soggetto) più decresce la profondità di campo, dunque avvicinarsi troppo alla superficie è svantaggioso in termini di qualità dell'immagine ed il guadagno ottenuto dal maggior ingrandimento viene perduto dalla sfocatura dei dettagli più lontani.

Blocchetto di riferimento spessore 1.00 mm

Distanza di ripresa	230	260	300	330	360	400
Media	1.150	1.150	0.971	1.014	1.045	1.059
Massimo	1.194	1.194	1.051	1.094	1.114	1.184
Minimo	1.106	1.106	0.919	0.927	0.975	0.946
Dev.st	0.022	0.022	0.037	0.049	0.044	0.064

Blocchetto di riferimento spessore 1.50 mm

Distanza di ripresa	230	260	300	330	360	400
Media	1.680	1.680	1.540	1.547	1.529	1.571
Massimo	1.714	1.714	1.625	1.655	1.627	1.741
Minimo	1.633	1.633	1.456	1.440	1.430	1.429
Dev.st	0.017	0.017	0.045	0.043	0.056	0.071

Blocchetto di riferimento spessore 2.00 mm

Distanza di ripresa	230	260	300	330	360	400
Media	2.210	2.209	2.027	2.035	2.058	2.101
Massimo	2.272	2.272	2.111	2.124	2.198	2.292
Minimo	2.152	2.151	1.957	1.938	1.913	1.963
Dev.st	0.030	0.030	0.046	0.051	0.055	0.069

Tabella 2: risultati delle elaborazioni dei dati sui blocchetti di riscontro

La profondità di campo è infatti direttamente proporzionale alla distanza di ripresa e al numero di apertura del diaframma, ed inversamente proporzionale alla lunghezza focale¹⁰ (

Tabella 3).

Distanza dal soggetto (mm)	Profondità di campo (mm)	Davanti al piano di messa a fuoco (mm)	Dietro al piano di messa a fuoco (mm)
230	5.9	2.9	3.0
260	7.8	3.9	4.0
300	10.8	5.3	5.5
330	13.4	6.6	6.8
360	16.3	7.9	8.3
400	20.5	10.0	10.5

Tabella 3: profondità di campo per obiettivo 60 mm con apertura di diaframma f/14 per la camera Canon EOS 400D

Dunque distanze di acquisizione comprese tra i 300 e 330 mm, quando possibile, sono da considerarsi un buon compromesso tra dimensioni dell'area rilevata (36x39 mm circa) e profondità di campo.

¹⁰ <http://www.dofmaster.com/dofjs.html> (ultimo accesso 14/12/2013)

3.1.2 Macchina fotografica Canon EOS 7D

L'accuratezza della misura fotogrammetrica è strettamente legata alla qualità dell'immagine fotografica da cui derivano tutte le informazioni geometriche dell'oggetto e della superficie acquisita. Per migliorare ulteriormente i risultati ottenuti, si è deciso di ripetere le prove con una nuova fotocamera caratterizzata da una maggiore pulizia del sensore, ed una maggiore nitidezza dell'immagine¹¹.

In

Tabella 4 sono riportate le caratteristiche dei sensori delle due fotocamere utilizzate:

	Canon EOS 400D	Canon EOS 7D
Dim. del sensore	CMOS 22,2 x 14,8 mm	CMOS APS-C 22,5 x 15 mm
Pixel effettivi	10,1 Megapixel	18 Megapixel
Pixel totali	10,5 Megapixel	19 Megapixel
Rapporto	3:2	3:2
Dim. del pixel	6 µm	4 µm

Tabella 4: caratteristiche dei sensori delle due fotocamere

¹¹http://www.canon.it/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_SLR/EOS_7D/
(ultimo accesso 14/12/2013)

http://www.zmphoto.it/articoli/166/canon_eos_7d_in_azione/ (ultimo accesso 14/12/2013)

Il rumore può essere definito come l'equivalente digitale della grana delle "vecchie" pellicole analogiche, ha l'effetto di creare vere e proprie sgranature che influiscono negativamente soprattutto nelle zone in cui i passaggi tonali sono più delicati, producendo un'alterazione più o meno evidente dei colori.

Esiste una precisa proporzionalità tra dimensioni dei fotodiodi (i singoli elementi sensibili che compongono un sensore fotografico comunemente detti *pixel*) e rumore: un fotodiodo, *pixel*, genererà tanto più rumore tanto più piccola sarà la sua superficie.

Risulta evidente che mantenendo invariate le dimensioni del sensore e aumentando il numero di *megapixel*, la superficie dei fotodiodi risulta minore.

È noto che le camere con una bassa densità di *pixel*, e quindi con maggior dimensione del *pixel* stesso, primeggiano nella qualità dell'immagine: il *pixel* con dimensioni più grandi hanno la capacità di catturare più luce e quindi garantiscono una resa migliore ad alte sensibilità (ISO).

Nel caso specifico della nuova Canon EOS 7D soluzioni tecniche innovative come le microlenti *gap-less*, disposte cioè senza soluzione di continuità una a fianco dell'altra, ed un nuovo disegno dei circuiti elettrici, hanno consentito di non sacrificare troppo la dimensione dei fotodiodi, in modo da poter ingrandire i pixel stessi e offrire prestazioni migliori con impostazioni ISO elevate.

A parità di dimensioni del sensore, la Canon 7D ne presenta uno da 18 Megapixel mentre la 400D da 10 Megapixel, dunque la densità di pixel con la stessa dimensione è maggiore nel caso della 7D, fattore che rappresenta un vantaggio in termini di nitidezza dell'immagine.

La scelta di non acquistare una camera con un sensore *full-frame*, ovvero una fotocamera con un sensore di dimensioni maggiori (36 x 24 mm¹²), e quindi con *pixel* di dimensioni più grandi, è legata al fatto che non sarebbe stato possibile riutilizzare gli obiettivi a nostra disposizione poiché le dimensioni della ghiera dove questi si agganciano alla camera, risulta diversa per la camera *full-frame*.

Le prove di acquisizione sui blocchetti di riscontro, come descritte nel paragrafo precedente, sono state ripetute con la Canon 7D.

Per ciascun blocchetto (*Figura 9*) una zona, di uguale misura, è stata esportata in formato *.xyz*; tale formato è un file di testo che contiene il nome dei punti e le relative coordinate XYZ separate da una virgola. Nel nostro caso, oltre alle coordinate spaziali, ad ogni singolo punto sono associate anche le coordinate di colore RGB, il file *.xyz* risulta quindi essere una matrice di *n* righe (numero dei punti) per 6 colonne (X,Y,Z,R,G,B).

¹² A parità di risoluzione un sensore full frame ha fotodiodi più grandi. I fotodiodi sono le cellette che trasformano la luce in impulsi elettrici per essere poi a loro volta trasformati in formato digitale nei pixel della foto. Uno dei fattori che influenza il rumore digitale è proprio la **dimensione dei fotodiodi**, dunque a parità di risoluzione, un sensore full frame ha maggiori probabilità di avere prestazioni migliori ad alti valori di sensibilità ISO rispetto ad altri sensori.

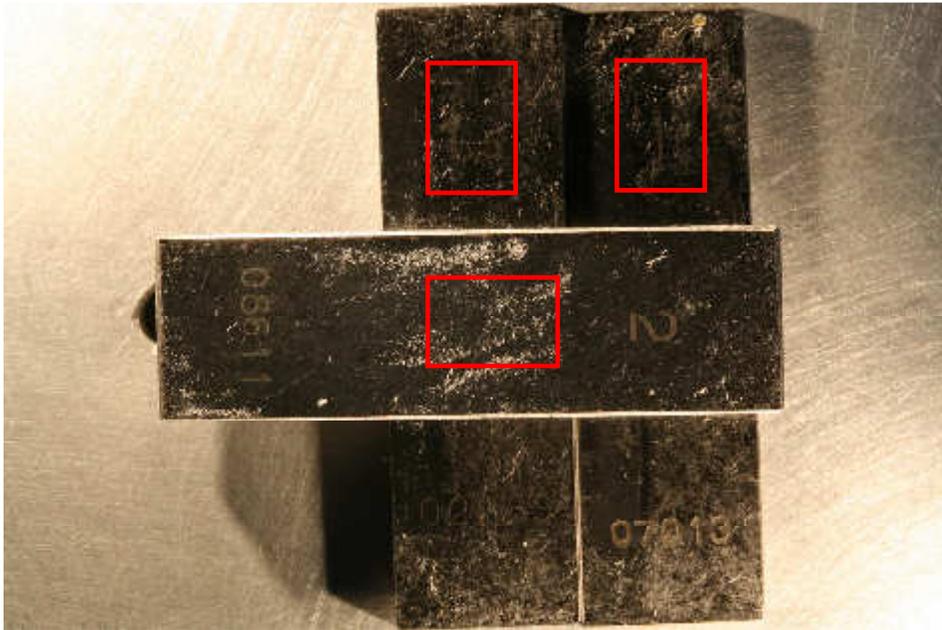


Figura 9: la zona dei modelli esportata in formato .xyz

Per l'analisi dei modelli è stata messa a punto una speciale routine di elaborazione dati in *Matlab*[®] con lo specifico obiettivo di allineare la superficie di ripresa con il piano di acquisizione interno alla macchina fotografica (sensore CMOS).

Il parallelismo tra le due superfici può essere in qualche modo approssimato solo in condizioni operative particolari, ovvero in laboratorio, dove con una livella è possibile verificare il parallelismo tra la barra (quindi la macchina fotografica) e la superficie di ripresa.

L'errore introdotto da un non perfetto allineamento tra la superficie ripresa e quella di presa può compromettere totalmente la stima delle imperfezioni superficiali.

In analogia al caso della realizzazione di ortofoto aree di terreno pianeggiante in cui le prese non siano state eseguite in assetto

perfettamente nadirale (situazione che si verifica comunemente nella realtà) si procede ad un raddrizzamento delle immagini così da riportarsi nella condizione ideale in cui le superfici risultino tra loro parallele: “assetto nadirale”.

L'errore introdotto dal disallineamento si manifesta in un'errata valutazione delle quote acquisite tra un punto della superficie e quello “diametralmente” opposto; se si tracciasse il profilo della superficie passante per i suddetti punti si noterebbe una pendenza del “profilo rilevato” che è però un artefatto dovuto al mancato allineamento dei piani di presa e di ripresa.

Lo stesso artefatto si ripresenta, in versione bi-dimensionale, nel caso della valutazione della rugosità della superficie, in questo caso si attribuirebbe alla superficie asperità di entità maggiore rispetto a quelle reali.

La nuvola di punti, cioè il modello nel formato .xyz, è interpolata con un piano che minimizza (*Figura 10*) lo scarto quadratico medio, cioè la differenza delle quote del piano è la stima dell'errore che si commette con il sistema micro-fotogrammetrico nell'approssimare la superficie.

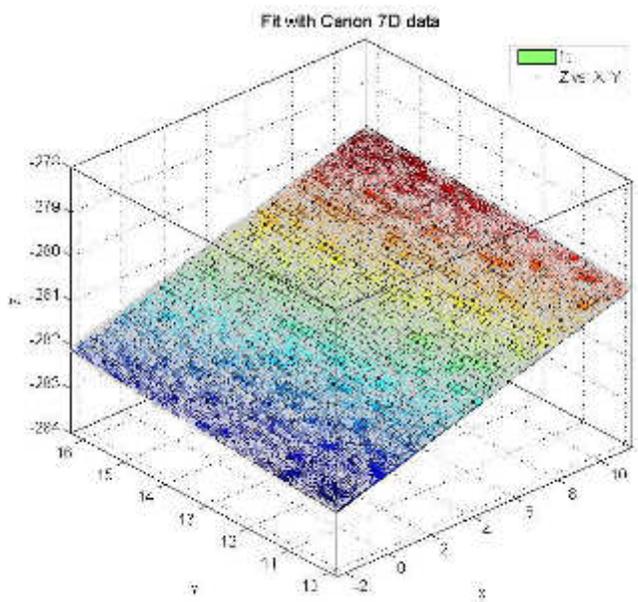
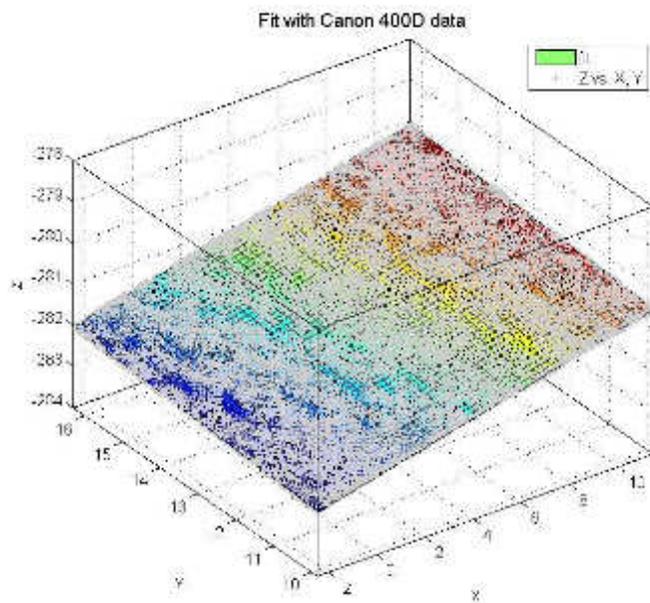


Figura 10: il piano di interpolazione della nuvola, in alto per i dati della 400D, in basso per la 7D

La nuvola di punti è stata poi analizzata utilizzando il metodo del **box-plot** per diminuire i parametri statistici.

Questo tipo di rappresentazione aiuta a capire la variabilità della misura rispetto al valore medio.

Adatto per tutti i tipi di distribuzione, il *box-plot*, detto anche *box and whiskers plot* (diagramma a scatola e baffi), è una rappresentazione grafica utilizzata per descrivere la distribuzione dei dati tramite semplici indici di dispersione e di posizione.

Per una corretta interpretazione di questo tipo di grafico è necessario ricordare che per ogni gruppo di dati il corrispondente rettangolo (la "scatola") è delimitato, dal primo quartile ($q1/4$) in basso e dal terzo quartile ($q3/4$) in alto. I quartili sono valori che ripartiscono l'insieme dei dati in 4 parti ugualmente popolate, che hanno lo stesso numero di valori.

Il rettangolo è poi diviso al suo interno dalla mediana ($q1/2$), nel caso di una distribuzione uniforme media e mediana coincidono.

I segmenti (i "baffi") identificano il minimo e il massimo dei valori che popolano il gruppo di dati.

In questo modo vengono rappresentati graficamente i quattro intervalli ugualmente popolati delimitati dai quartili, e quando presente, con la riga rossa, è indicato il valore medio.

Lo studio dei dati ha messo in luce come l'acquisizione delle immagini e dunque la generazione dei modelli, con la fotocamera Canon 7D, non riducesse l'errore lungo l'asse Z, ma che la dispersione sui dati

acquisiti risulta inferiore rispetto alla precedente fotocamera (Canon EOS 400D).

La deviazione standard (*Figura 11 – Tabella 5*) sulla stima della quota risultava infatti più piccola nel caso della 7D, per tanto la misura era da considerarsi più precisa essendo affetta da un errore minore.

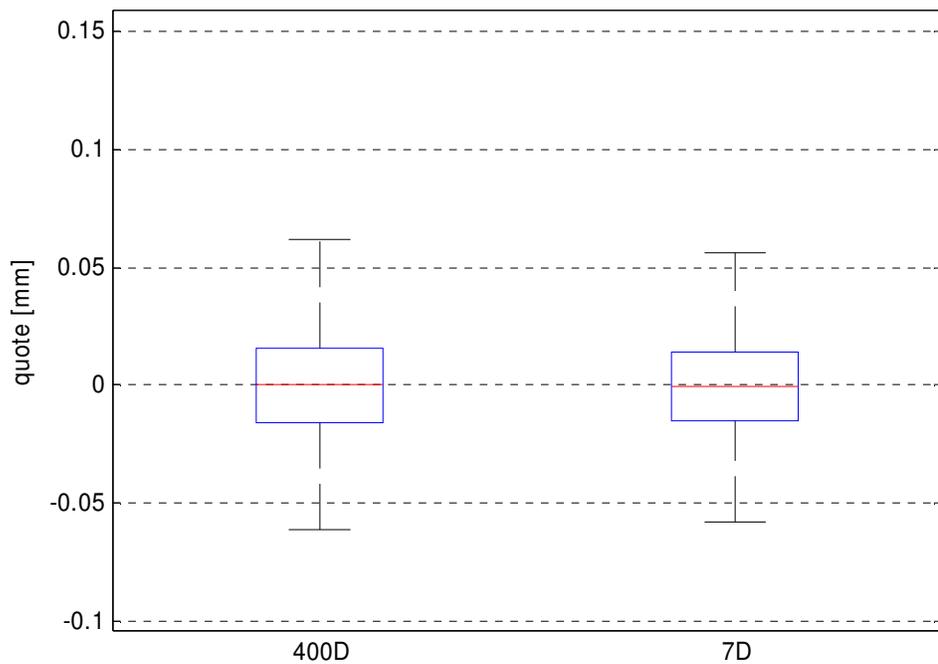


Figura 11: deviazione standard sulla stima delle quote per le due fotocamere

Camera	Media [μm]	Deviazione standard σ [μm]	Mediana [μm]	1° quartile (25%) [μm]	3° quartile (75%) [μm]	IC 95% [μm]	IC 99% [μm]
400D	0	23,0	0,1	-15,5	15,3	+45,0 -45,0	+59,3 -59,3
7D	0	23,4	-0,8	-14,8	13,7	+45,8 -45,8	+60,3 -60,3

Tabella 5: deviazione standard sulla stima della quote. IC, Intervallo di Confidenza

Allo scopo di migliorare ulteriormente i dati ottenuti, è stato deciso di indagare altri aspetti che potessero influenzare il dato.

Oltre a modificare il *set-up* di misura, sono stati approfonditi altri fattori come lo *step* di acquisizione delle immagini, ovvero la distanza intermedia tra uno scatto e l'altro eseguito dal sistema, e il valore di risoluzione dei modelli in fase di generazione.

Il nuovo *set-up* ha reso necessario l'allestimento di un banco di prova all'interno del laboratorio fotografico in modo da poter replicare le misure in un ambiente controllato, ricreando la geometria di ripresa e le condizioni di illuminamento.

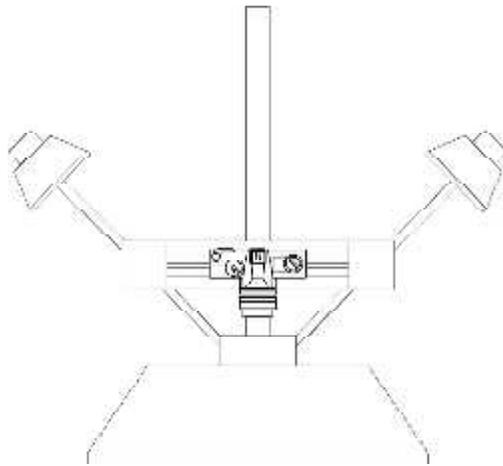


Figura 12: schema del set-up di misura

I provini sono stati posizionati singolarmente su un piano di riscontro. La barra lungo la quale scorre la fotocamera è stata posizionata parallelamente al piano di riscontro, ed agganciata ad uno stativo fotografico. Le lampade sono state poste ad una distanza di circa 60 cm dal centro del piano di riscontro e inclinate di circa 45° rispetto alla normale dello stesso piano (Figura 12).

Sono state utilizzate delle lampade a led a luce bianca le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 6, ed inoltre oscurate le ulteriori fonti di luce nella stanza.

Tensione	230 V ac
Potenza	20 W
Temperatura di colore	6000 K
Angolo di apertura	120°
Flusso luminoso	1500 Lm

Tabella 6: caratteristiche delle lampade usate durante l'acquisizione

Il *software* di acquisizione suggerisce uno *step* di ripresa pari a $1/20$ della distanza, ad esempio se la superficie da acquisire si trova ad una distanza di 330 mm dal sensore della camera, la distanza tra i singoli scatti risulterà essere di 16.5 mm (la *baseline*, ovvero la distanza tra il primo e l'ultimo scatto, sarà pari a 33.0 mm).

Durante le precedenti sperimentazioni le acquisizioni erano state effettuate utilizzando come base di scatto lo *step* suggerito dal sistema (distanza tra i singoli scatti). Per verificare se il valore suggerito fosse effettivamente quello giusto sono stati effettuati alcuni *test*, mantenendo fissa la distanza di acquisizione a 330 mm, si è provveduto a variare la distanza tra gli scatti: la prima acquisizione è stata effettuata utilizzando la base di scatto suggerita, 16.5 mm, successivamente la base è stata aumentata di volta in volta di 0.5 mm fino ad arrivare ad una base di 30 mm, e diminuita della stessa quantità fino ad un minimo di 3.0 mm.

Il comportamento dell'errore sulla stima dell'altezza del provino campione in funzione rapporto base su distanza di ripresa (b/d), è stato valutato per il blocchetto di altezza nominale 1.5 mm.

Le prove effettuate hanno messo in luce come l'errore relativo nella stima della rilevazione della quota raggiunge il 2% (*Figura 13*) quando viene rispettata la condizione del rapporto b/d di $1/20$ (0.05 mm).

L'errore relativo rimane pressoché costante fintanto che le immagini acquisite con i tre scatti sono sovrapponibili, quando questa

condizione viene meno il modello non è più generabile non potendo essere determinati dei punti omologhi su due scatti consecutivi.

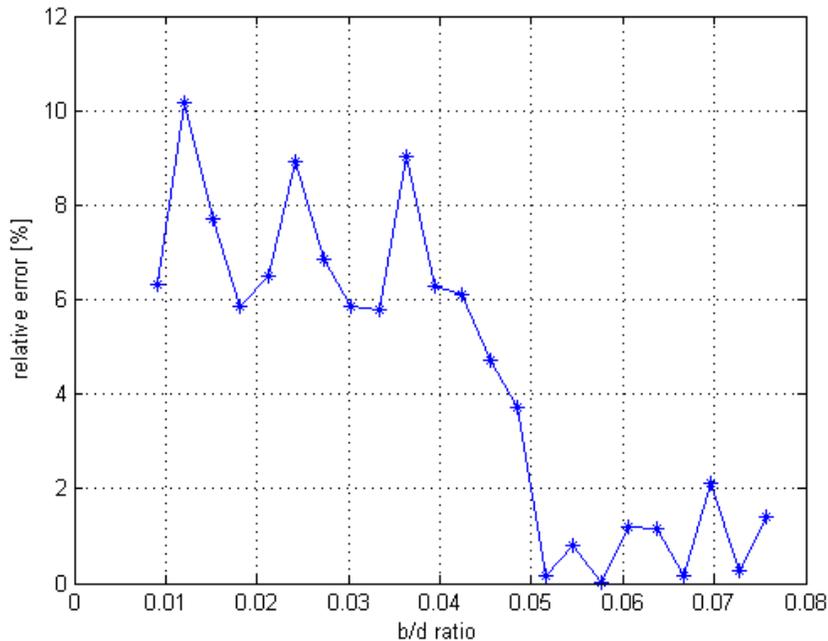


Figura 13: comportamento dell'errore relativo su provino campione di altezza 1,5 mm in funzione del rapporto base su distanza di ripresa (b/d)

Una volta acquisite le tre immagini, queste vengono esportate verso il *software* che si occupa della generazione dei modelli, eliminate le distorsioni geometriche e ottiche e scelta l'area da generare, è stato scelto lo *step* di risoluzione per la generazione del modello, ovvero ogni quanti *pixel* dell'immagine fotografica, il *software* deve ricostruire un punto tridimensionale.

Durante le prove effettuate con la 400D, i modelli erano stati generati con uno *step* pari a 5 px, ma si è notato che la scelta di un

passo di risoluzione elevato non migliora di fatto la qualità del modello, ma crea un maggior quantità di rumore che rende la superficie più “rugosa” falsando la lettura della superficie (Figura 14).

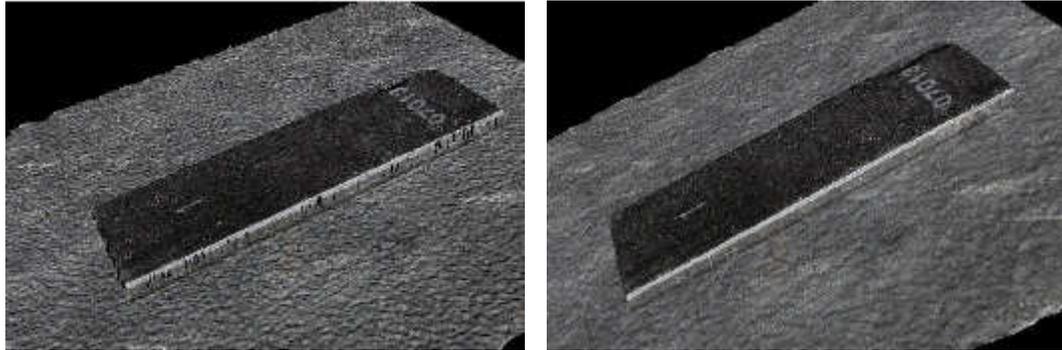


Figura 14: a sinistra il modello elaborato con un step di risoluzione pari a 5 px, a destra quello elaborato a 10 px

È stato dunque valutato l’errore introdotto dal campionamento con diverse risoluzioni, per questo si è scelto di generare i modelli con una risoluzione pari a 5 px e 10 px. I risultati così ottenuti sono stati confrontati su ciascuna delle acquisizioni al fine di verificare la rumorosità dei due approcci (Figura 15 - Tabella 7).

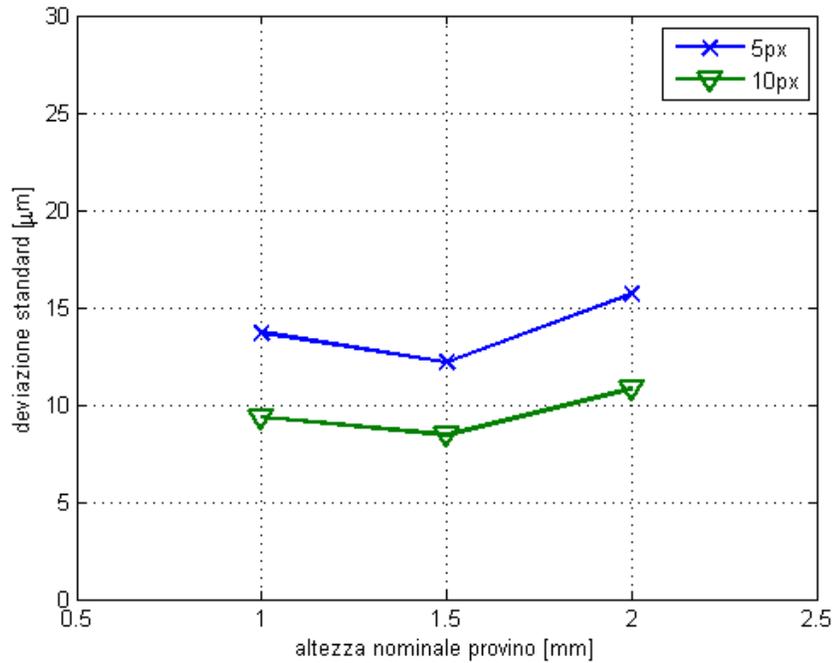


Figura 15: andamento della deviazione standard (σ) delle quote dei provini campione in funzione della loro altezza nominale

Altezza nominale del provino [mm]	Risoluzione campionamento 5 pixel			Risoluzione campionamento 10 pixel		
	media [mm]	σ [μm]	2σ [μm]	media [mm]	σ [μm]	2σ [μm]
1,0	1,073	49,6	99,2	1,007	38,2	76,3
1,5	1,499	54,7	109,4	1,508	38,6	77,2
2,0	1,933	54,8	109,7	2,016	36,0	72,1

Tabella 7: deviazione standard delle quote

Dunque la generazione del modello con uno *step* di risoluzione pari a 5 px, evita la presenza di “rumore” eccessivo che potrebbe falsare la lettura delle quote, la nuvola di punti che si ottiene risulta sufficientemente “densa” per descrivere la superficie acquisita.

3.2 Valutazione dell'errore

In seguito alle considerazioni viste fin ora, seguendo il nuovo *set-up* di misura (*Figura 12*), ciascun blocchetto é stato nuovamente acquisito da distanze diverse: 270, 300, 330, 360 e 400 mm (distanza tra il sensore della camera e il blocchetto di riscontro), scegliendo come distanza tra gli scatti (*step*) quella suggerita dal sistema (1/20 della distanza), e generando i modelli con un passo di risoluzione pari a 10 px.

Come abbiamo già detto, il riflesso è un fenomeno ottico che incrementa il “rumore” (incertezza) nella ricostruzione 3D e che rende difficile l’acquisizione della superficie e quindi la generazione del modello stesso.

Per ovviare a questo problema è stata utilizzata una polvere antiriflesso (*Figura 16*), *PowderPen*¹³ in dotazione al laser da tavolo *NextEngine*, che consiste in micro granuli di talco con una traccia di lanolina per meglio aderire alle superfici e facilmente rimovibile con un panno; i blocchetti ed il piano di riscontro sono stati spolverati avendo cura di non formare accumuli di polvere sulla superficie.

¹³ <http://www.nextengine.com/faq#in-the-box> (ultimo accesso 14/12/2013)



Figura 16: PowderPen, contenente la polvere antiriflesso

Nel corso delle riprese sono state utilizzate le stesse impostazioni per la macchina: modalità AV (*Aperture Value*), che permette di impostare manualmente l'apertura del diaframma e regola automaticamente la velocità dell'otturatore in funzione della luminosità dell'ambiente.

L'apertura del diaframma è stata impostata ad un valore pari a $f/16$ per aumentare la profondità di campo¹⁴ (*Tabella 8*)

¹⁴ <http://www.dofmaster.com/dofjs.html> (ultimo accesso 14/12/2013)

Distanza dal soggetto (mm)	Profondità di campo (mm)	Davanti al piano di messa a fuoco (mm)	Dietro al piano di messa a fuoco (mm)
230	6.6	3.3	3.3
260	8.8	4.3	4.5
300	12.2	6.0	6.2
330	15.1	7.4	7.7
360	18.3	8.9	9.4
400	23.0	11.2	11.8

Tabella 8: profondità di campo per obiettivo 60 mm con apertura di diaframma f/16 per la camera Canon EOS 7D

La velocità ISO (sensibilità alla luce del sensore immagine) è stata impostata a 400¹⁵.

Per ogni acquisizione sono state ripetute le seguenti fasi al fine di considerare l'errore introdotto nel posizionamento e nell'intera procedura di acquisizione:

- posizionamento della camera alla distanza voluta;
- messa a fuoco automatica della camera sulla faccia del blocchetto;

¹⁵ la macchina fotografica digitale Canon7D permette di lavorare anche con valori ISO molto alti senza aumentare il "rumore" dell'immagine:

http://www.canon.it/For_Home/Product_Finder/Cameras/Digital_SLR/EOS_7D/ (ultimo accesso 14/12/2013)

http://www.zmphoto.it/articoli/166/canon_eos_7d_in_azione/ (ultimo accesso 14/12/2013)

- disinserimento del fuoco automatico ed esecuzione della procedura di stima della distanza tra soggetto e camera per verifica (valutazione automatica della distanza blocchetto/sensore effettuata dal programma);
- esecuzione della strisciata di acquisizione, con step di scatto (b) uguale $1/20$ la distanza dal soggetto (d);
- acquisizione della tripletta di immagini.

Per ogni spessore i singoli modelli sono stati sovrapposti tra loro con un errore residuo lungo le tre direzioni, XYZ, compreso tra 0.06 e 0.04 mm. Scelto un sistema di riferimento UCS comune a tutti i modelli sono state estrapolate più zone: sul modello acquisito è stato estratto il riferimento del piano (Ref.) ed esportato in formato .xyz, per ogni modello è stata esportata la parte centrale (*Figura 17*) evitando le zone di bordo soggette ad una maggiore incertezza di ricostruzione.

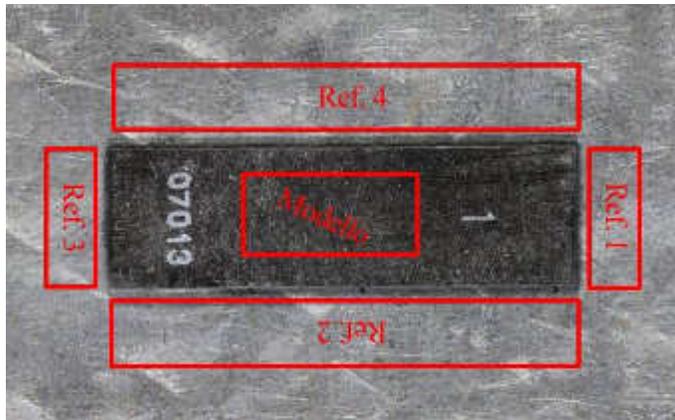


Figura 17: individuazione sul modello delle aree esportate in formato .xyz per l'analisi in Matlab

Dall'elaborazione dei dati è emerso come, acquisendo le immagini da una distanza compresa tra i 300 e i 330 mm, utilizzando uno step di acquisizione pari a $1/20$ della distanza¹⁶, e utilizzando un passo di risoluzione di 10 px durante la fase di generazione del modello, l'errore che si commette sulla stima dell'altezza nominale del blocchetto di riscontro, è pari a $10 \mu\text{m}$ (Tabella 9).

¹⁶ Si ricorda che in funzione delle caratteristiche superficiali e geometriche dell'oggetto da acquisire è possibile variare il valore dello *step*; la scelta dipende dall'operatore ed è legata all'esperienza sul campo.

Valore nominale (mm)	Valore stimato (mm)	Errore assoluto (mm)	Errore relativo percentuale
1.0	1.007	0.007	0.7%
1.5	1.508	0.008	0.5%
2.0	2.016	0.016	0.8%
		0.010	0.7%

Tabella 9: errore effettuato sulla stima dell'altezza nominale del provini

Per valutare l'errore commesso dal sistema sul piano XY, si è proceduto nel seguente modo: per ogni blocchetto di spessore diverso, è stato scelto di esportare due porzioni del modello, in direzione X e in direzione Y (*Figura 18*).

Sono stati utilizzati i modelli acquisiti alla distanza di 330 mm, in modo da avere la ricostruzione tridimensionale dell'intero blocchetto e buona parte della base di alluminio su cui questo poggia.

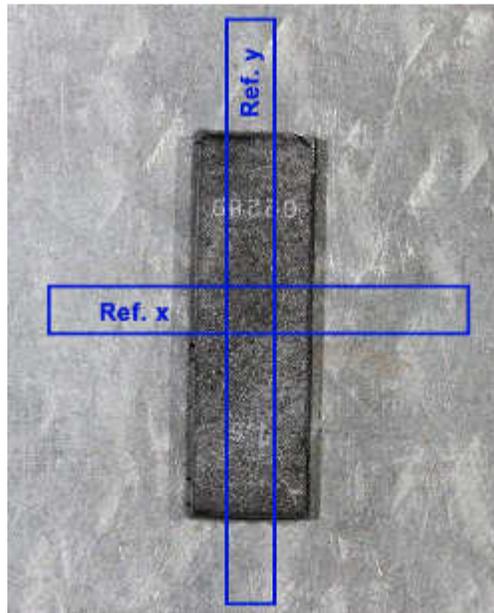


Figura 18: le aree esportate per la valutazione dell'errore lungo l'asse xy

Sul blocchetto di spessore 1.5 mm, sono state eseguite delle misure di verifica con comparatore digitale Mitutoyo¹⁷ serie 543 (*Figura 19*), errore massimo 0.006 mm, i risultati ottenuti sono riportati in Tabella 10.

¹⁷http://www.mitutoyo.it/CatalogoOnLine/Famiglie/1_StrumentiDaBanco_Seiz4.pdf
?OpenElement (ultimo accesso 14/12/2013)



Figura 19: misure sul blocchetto di spessore 1,5 mm con il comparatore digitale

La deviazione standard riscontrata sul provino di spessore di 1.5 mm è pari a 8.2 μm lungo l'asse X e di 27.7 μm lungo l'asse Y.

Valori così elevati sono forse da imputarsi al difficile posizionamento del provino per la misurazione.

	X mm	Y mm
	8.8405	29.7795
	8.8455	29.715
	8.844	29.7385
	8.8325	29.776
	8.855	29.737
Media (mm)	8.8435	29.7492
Dev.st. (μm)	8.2	27.7

Tabella 10: misure di verifica lungo gli assi XY sul blocchetto di spessore 1.5 mm

Le aree indicate in Figura 18, sono state esportate nel formato .xyz (Figura 20) per essere elaborate in *MatLab*[®].

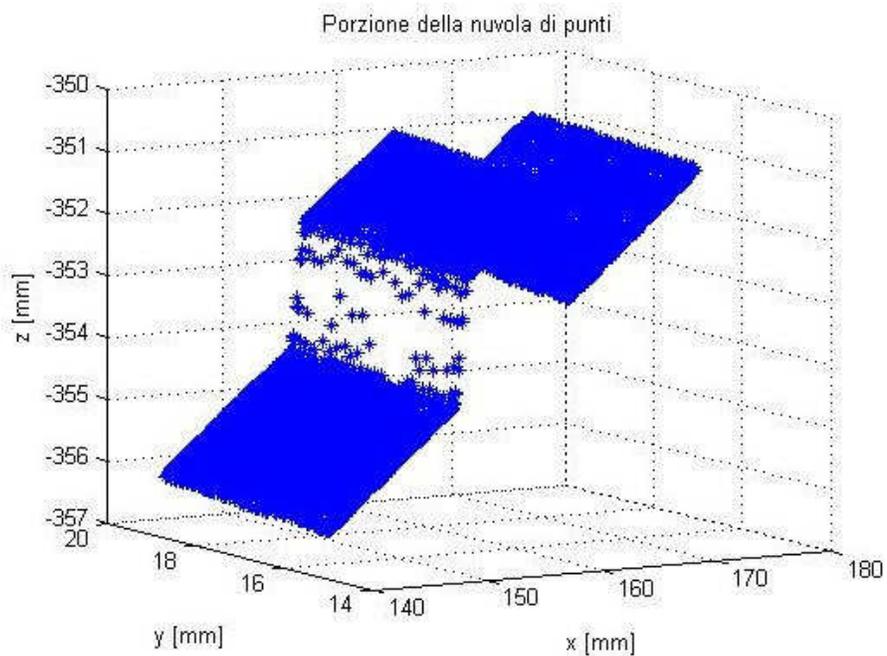


Figura 20: la nuvola di punti

Attraverso le routine appositamente progettate, il piano di messa a fuoco, cioè la superficie del blocchetto, è stato approssimato con un piano di interpolazione successivamente allineato con il sistema di riferimento della camera (*Figura 21*).

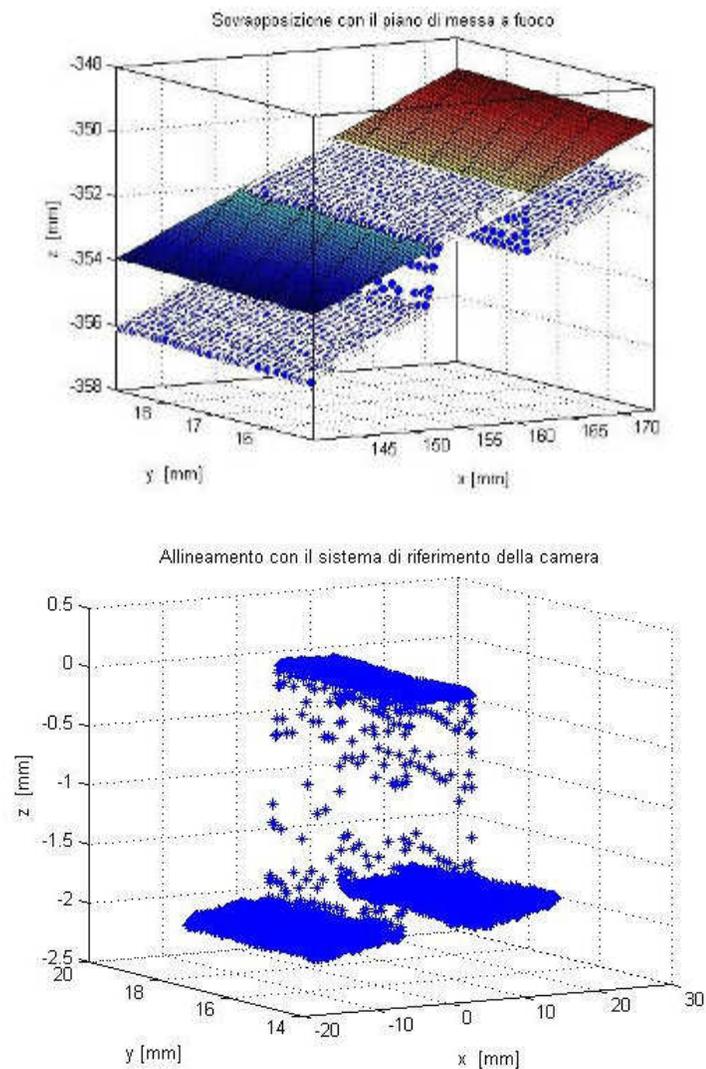


Figura 21: in alto il piano di interpolazione, in basso l'allineamento con il piano di riferimento della camera

La proiezione lungo l'asse X del profilo ha permesso di fare la media tra tutti i profili a Y costante (*Figura 22*), pertanto il valore di X ottenuto con questo tipo di valutazione è da considerarsi come il valore medio tra tutti i possibili profili.

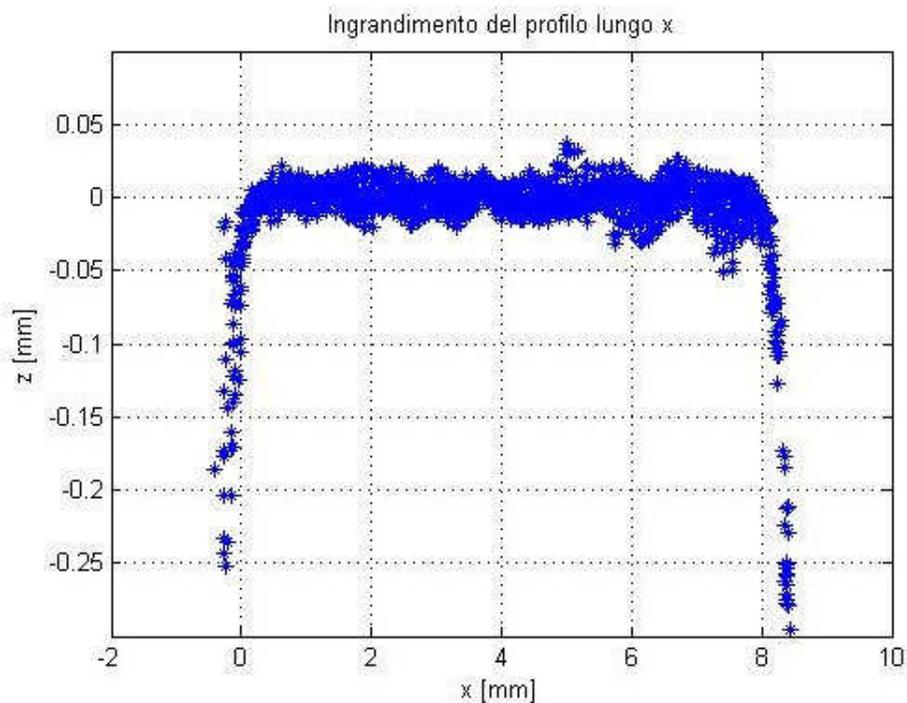


Figura 22: il profilo del blocchetto di riferimento lungo l'asse X

Allo stesso modo è stata elaborata la porzione in direzione Y: esportazione della porzione in formato .xyz, approssimazione del piano di messa a fuoco con un piano di interpolazione, allineamento di quest'ultimo con il sistema di riferimento della camera.

La proiezione lungo l'asse Y del profilo ha permesso di fare la media tra tutti i profili a X costante (Figura 23), pertanto il valore di Y ottenuto con questo tipo di valutazione è da considerarsi come il valore medio tra tutti i possibili profili.

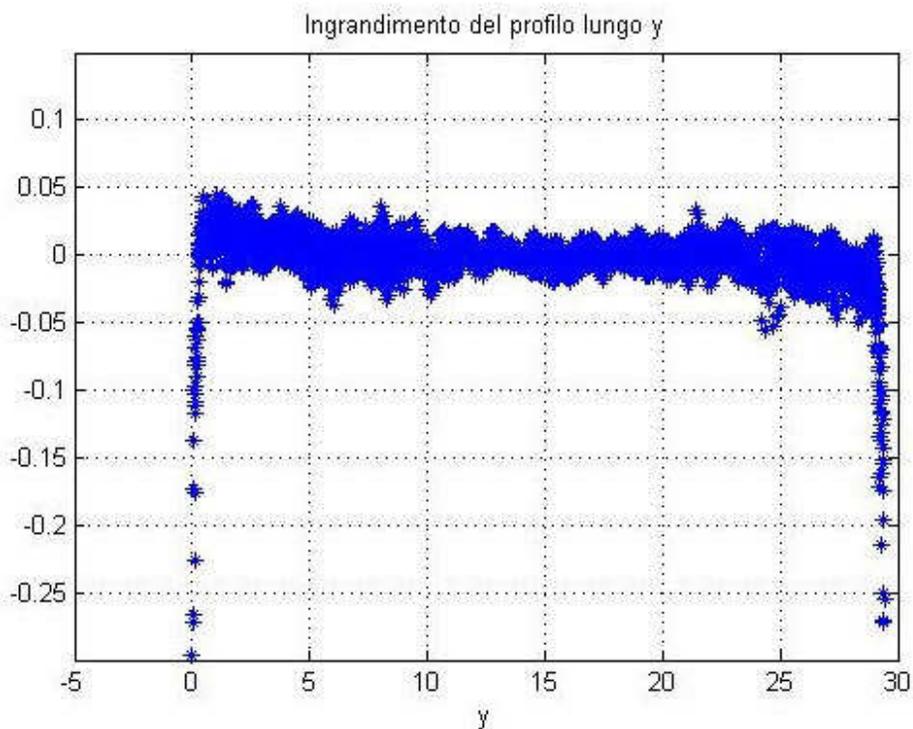


Figura 23: il profilo del blocchetto di riferimento lungo l'asse Y

I valori ottenuti sul piano di riferimento XY sono stati messi a confronto con le misure effettuate con il comparatore digitale (Tabella 11).

	Comparatore Mitutoyo		Fotogrammetria		Errore	
	X	Y	X	Y		
	8.8405	29.7795	8.4330	29.2271		
	8.8455	29.715	8.5810	29.0747		
	8.844	29.7385	8.3271	28.9872		
	8.8325	29.776				
	8.855	29.737				
Media [mm]	8.844	29.749	8.447	29.096		
Dev. St [μm]	8.2	27.7	127.5	121.4		
Err. Rel%					-4%	-2%
Err. Ass%					-0.396	-0.653

Tabella 11: confronto tra le misure effettuate con il comparatore digitale e il sistema micro-fotogrammetrico

Quello che emerge è che l'errore commesso dal sistema lungo gli assi è elevato (compreso tra 400 e 600 μm). Valori così alti sono forse da imputarsi alla configurazione dell'oggetto acquisito.

Le superfici laterali dei blocchetti, nel modello a nuvola di punti, non risultano perpendicolari rispetto al piano di alluminio su cui poggiano, ma presentano invece un andamento trapezoidale (Figura 24).

La misura lungo l'asse X, nel caso specifico della Figura 24, viene calcolata all'intersezione delle tracce dei piani che interpolano le superfici laterali e la superficie orizzontale del blocchetto di riscontro.

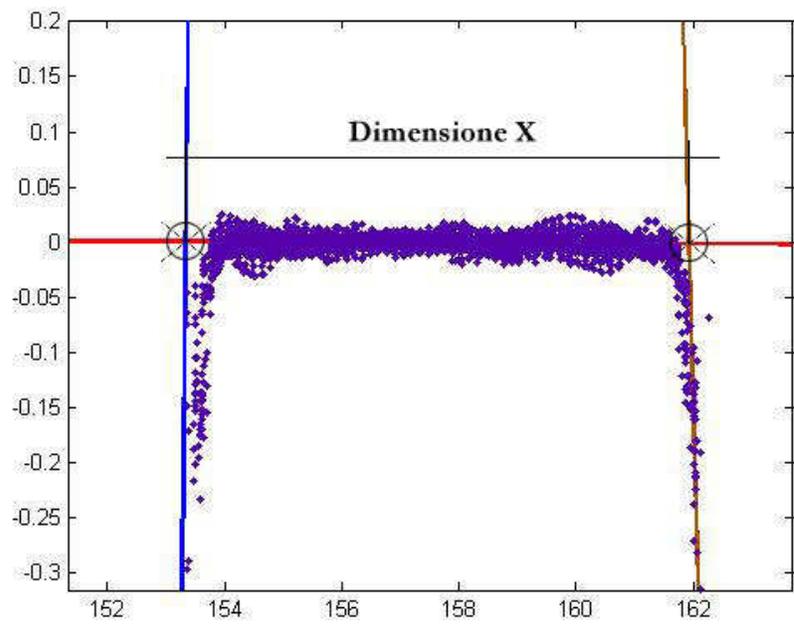
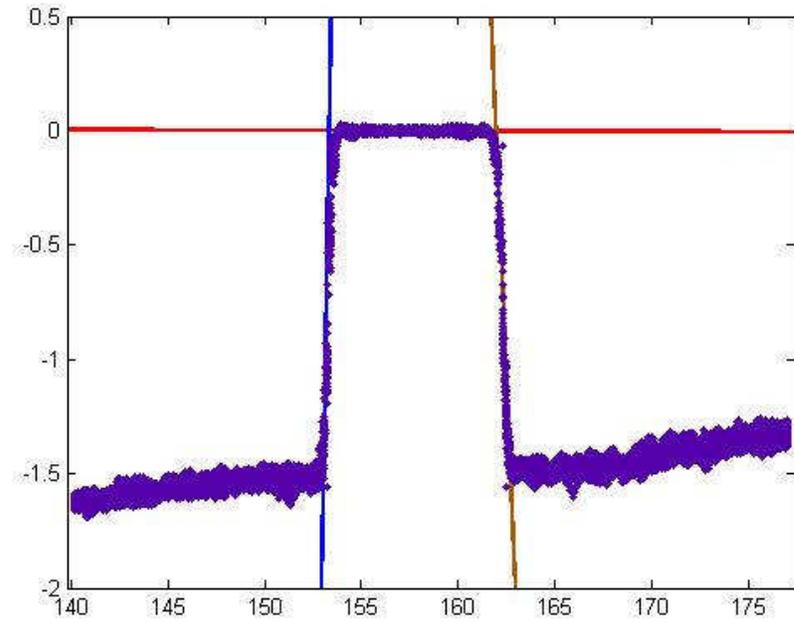


Figura 24: misura del blocchetto di riscontro lungo l'asse X

Questa particolare conformazione del modello, è da imputarsi al fatto che il sistema non riesce a rilevare bene le superfici laterali del blocchetto, quindi la nuvola di punti del modello risulta in queste zone non molto densa e poco descrittiva della superfici; in fase di generazione del modello queste aree vengono così approssimate ottenendo questo effetto trapezoidale (*Figura 25*).

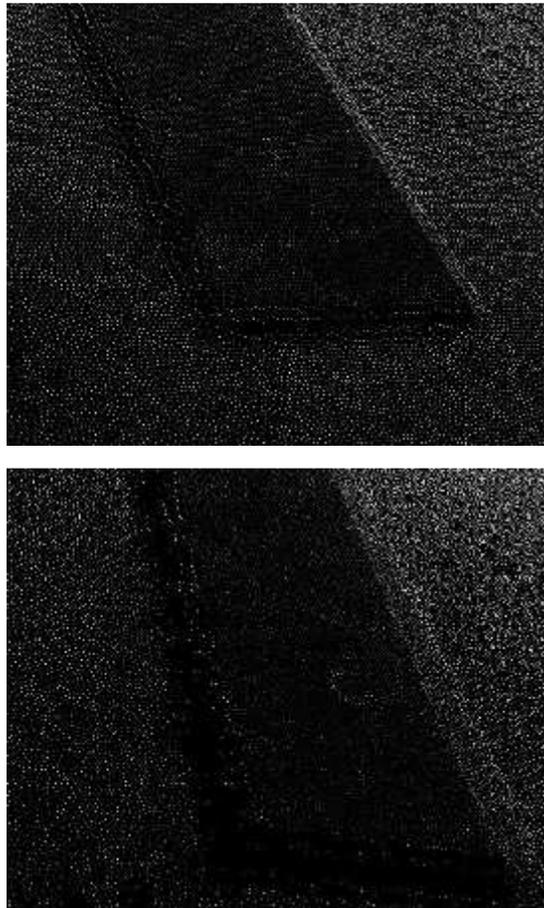


Figura 25: i modelli dei blocchetti di spessore 1.0 mm, in alto, e 2.0 mm, in basso, rappresentati a nuvola di punti; particolare delle superfici laterali

In conclusione, utilizzando la macchina fotografica Canon EOS7D equipaggiata con obiettivo macro Canon 60 mm, le condizioni migliori di acquisizione delle immagini e della loro successiva elaborazione possono essere riassunte come segue:

- La distanza da preferire per l'acquisizione delle immagini, risulta essere compresa tra i 300 e i 330 mm, il miglior compromesso tra profondità di campo e dimensioni della superficie rilevata;
- La scelta di diaframmi molto chiusi (da f/14 in su) migliora la profondità di campo dell'obiettivo;
- Scegliere una *baseline* (distanza tra il primo e l'ultimo scatto) pari ad 1/10 della distanza tra il sensore e la superficie da rilevare;
- Elaborare le immagini per la generazione del modello tridimensionale, con uno *step* di risoluzione pari a 10 px;
- Utilizzare la specifica routine in *Matlab*[®] per migliorare l'allineamento della superficie acquisita al piano di messa a fuoco della camera.

Utilizzando questa procedura possiamo affermare che, l'errore che si commette lungo l'asse Z risulta essere pari a **10 μm**, mentre l'errore commesso sul piano XY, se valutato in maniera automatica dal sistema, risulta invece più alto.

4. Applicazioni

A titolo illustrativo, di seguito vengono riportati alcuni esempi di applicazione del sistema micro-fotogrammetrico sia a fini diagnostici che documentativi.

Per quest'ultimo tipo di applicazione particolare attenzione è stata posta alle fasi di allineamento dei modelli, alla ricostruzione della superficie (*mesh*) dell'oggetto e alla procedura di texturizzazione.

4.1 Applicazioni a fini diagnostici

Il metodo micro-fotogrammetrico è stato utilizzato presso l'Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali (ICVBC-CNR) per il monitoraggio del degrado e degli effetti di trattamenti conservativi nel tempo [20]-[26].

Questo tipo di indagine, infatti, può risultare molto utile per il monitoraggio delle fasi della pulitura di un dipinto, un affresco, ecc. In generale, l'efficacia di un trattamento di pulitura può essere seguita anche visivamente dall'operatore, anche se in maniera soggettiva; la misura micro-fotogrammetrica permette una verifica obiettiva delle eventuali modificazioni della superficie dell'opera.

4.1.1 La micro-fotogrammetria per la valutazione di interventi di pulitura

Gli interventi di pulitura possono essere considerati una operazione critica nel campo della conservazione dei Beni Culturali, si tratta infatti di un trattamento irreversibile che prevede la rimozione di materiale dalla superficie. Per evitare l'eliminazione di materiali costitutivi dell'opera stessa durante le fasi di pulitura, è necessaria un'estrema selettività e un monitoraggio continuo del trattamento. Le tecniche di monitoraggio normalmente utilizzate sono le indagini colorimetriche e il campionamento per caratterizzare lo spessore della patina (*Figura 26*).



Figura 26: un campione in sezione sottile osservato al microscopio

Mentre le indagini colorimetriche possono essere ripetute durante tutta la fase di pulitura, il campionamento viene effettuato soltanto all'inizio e alla fine del trattamento, in quanto, anche se i campioni risultano microscopici, tale procedura è da considerarsi una tecnica micro-distruttiva.

Tenendo conto di queste considerazioni, è stato valutato se il metodo micro-fotogrammetrico, non invasivo e non distruttivo, potesse

essere o meno di supporto durante le fasi di pulitura per avere una valutazione “qualitativa”, ma obiettiva, del materiale rimosso.

La sperimentazione delle applicazioni di questo metodo è stata effettuata in collaborazione con Alberto Felici, Restauratore OPD (Opificio delle Pietre Dure) associato all’ ICVBC, su una pittura distaccata proveniente dall’Arco della Pesa di Borgo Sansepolcro (AR).

Le pitture, risalenti al XVI secolo collocate nel sottarco (*Figura 27*), furono sottoposte, intorno alla metà del secolo scorso, ad un intervento di restauro, eseguito dalla bottega di Leonetto Tintori¹⁸, che comprese lo stacco delle pitture e la loro collocazione su supporti mobili, successivamente trasportati a Firenze nel deposito della Soprintendenza Territoriale presso Palazzo Pitti.

¹⁸ Leonetto Tintori, durante lo scorso secolo eseguì i restauri di molti dei maggiori cicli pittorici fiorentini, la sua attività si ampliò soprattutto nel territorio Toscano. Le attività di restauro di Leonetto Tintori, si sono svolte nel laboratorio della Soprintendenza in via della Ninna a Firenze ed in seguito all’alluvione, nella Limonaia del Giardino di Boboli, insieme ad Alfio del Serra, Francesco Rosi e, successivamente, Giovanni Cabras.



Figura 27: l'arco della Pesa e un particolare delle pitture del sottarco

I frammenti di pittura furono collocati su un supporto di masonite¹⁹[27] di 149 x 169 x 2,5 cm; nel caso studio si trattava delle fasce laterali che decoravano l'arco. Date le grandi dimensioni del supporto, era lecito ipotizzare che la posizione *in situ* delle fasce decorative fosse la stessa che vediamo oggi sul pannello. Le pitture erano state eseguite mediante la tecnica pittorica del bianco di calce²⁰[28], utilizzando come pigmenti ocre rosse e gialle, bianco di calce e nero di carbone.

¹⁹ Materiale costituito da fibre di legno compresse, usato per l'isolamento di interni e commercializzato in forma di pannelli (Cfr. AA.VV., *Dizionario del restauro. Tecniche Diagnostica Conservazione*, Cristina Gianni (a cura di), Firenze, Nardini Editore, 2012); questi venivano utilizzate per la risupportazione di affreschi staccati. In questi casi il materiale viene impregnato con resine ed oli che lo rendono più resistente all'umidità e all'abrasione (masonite temperata).

²⁰ Per "pittura alla calce" si intende l'uso di colori mescolati alla calce che ha la funzione di vero e proprio legante del colore (Cfr. AA.VV., *Le tecniche artistiche*.

Sullo strato pittorico era presente una patina (ossalato di calcio) di colore bruno dovuta, con buona probabilità, ad un trattamento protettivo a base di sostanze organiche, nella fattispecie colla animale, alteratosi nel tempo.

Lo stato di conservazione della pittura risultava buono, con spessore molto consistente della pellicola pittorica e, in molte zone, era ancora presente un sottile spessore dell'intonaco originale messo in luce da micro sollevamenti, diffuse abrasioni e profonde fessurazioni.

Sulla superficie dell'affresco erano state scelte tre diverse aree: due di queste erano state pulite con trattamenti laser, ed una con un trattamento di pulitura chimico (*Figura 28*).

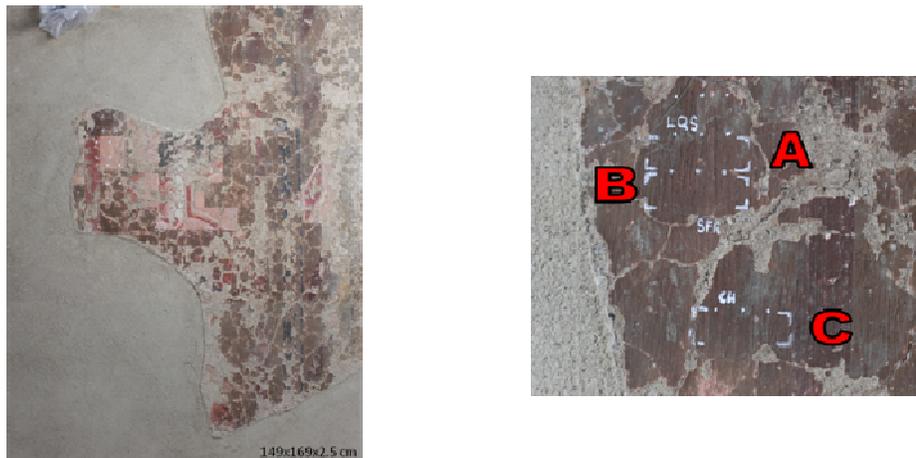


Figura 28: a sx il pannello con il frammento di pittura, a dx il particolare delle zone trattate

Ideazione e coordinamento di Corrado Maltese, Azzate (Varese), Ugo Murzia Editore, 2006).

Il laser utilizzato per la rimozione della patina, del tipo Nd:Yag prodotto da El.En Group, era stato impiegato in due diverse modalità, **LQS** (*Long-Q Switched*) nell'area "A" e **SFR** (*Short Free Running*) nell'area "B", con le seguenti caratteristiche:

Modalità	Long-Q Switched	Short Free Running
Lunghezza d'onda	1064 nm	1064 nm
Energia	130 mJ	200 mJ
Frequenza	3 Hz	3 Hz
Spot Ø	3,10 mm	2,75 mm
Fluenza	1,73 J/cm ²	3,36 J/cm ²
Durata impulso	100 ns	40µs
Modo	DRY mode	DRY mode

Su ogni area trattata con il laser era stata effettuata una pulitura progressiva, così l'intera area è stata suddivisa in quattro parti (A, B, C e D).

Nella sottoarea denominata A non era stato effettuato alcun trattamento (area non trattata), un primo passaggio di pulitura laser aveva interessato le sotto-aree B, C e D, un secondo passaggio le sotto-aree C e D, ed infine un terzo ed ultimo passaggio la sotto-area D (*Figura 29*).

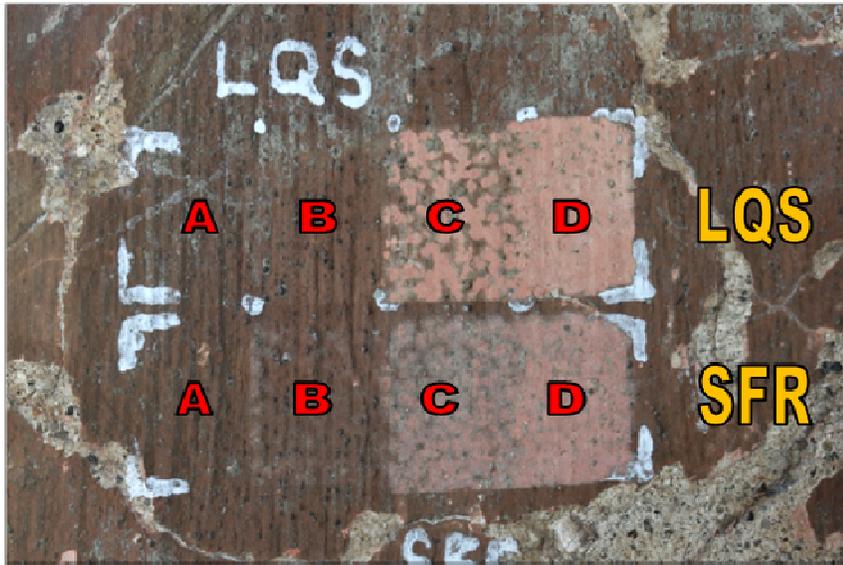


Figura 29: le aree A e B sottoposte a trattamento di pulitura laser: in alto in modalità LQS, ed in basso in modalità SFR

Per la pulitura chimica, area C, era stato utilizzato un impacco di Carbogel²¹ (4% H₂O) e EDTA bisodico²² (5% H₂O).

²¹ Il Carbogel, risultato di una ricerca effettuata su prodotti gelificanti per impacchi, e costituito da acido poliacrilico neutralizzato, che permette la preparazione di un gel per semplice aggiunta di acqua, la cui viscosità può essere variata a piacimento. È sufficiente una quantità variabile dallo 0,5% al 4% in peso di Carbogel in soluzioni acquose per ottenere un gel ad alta viscosità, particolarità che risolve i problemi di rimozione dal supporto dei gel utilizzati finora, legati anche alle quantità di materiale solido in gioco, Carbogel ha un'alta capacità di ritenzione dell'acqua, che evapora così in tempi molto lunghi. L'acido poliacrilico modificato Carbogel può essere addizionato agli impasti di polpa di cellulosa e alle classiche soluzioni di ammonio carbonato o bicarbonato, EDTA, ecc. (http://www.ctseurope.com/depliant/%7BEA265392-AF26-4FC6-930B-A78676DE0593%7D_Pagine%20da%203.1%20prodotti%20chimici%20e%20solventi%20puri-83.pdf) (ultimo accesso 14/12/2013)

²² Sale di acido organico (Acido Etilendiamminotetracetico, sale bisodico) utilizzato in soluzioni acquose con altri reagenti ed inerti per la preparazione di pappette o impacchi di pulitura per superfici lapidee ed affreschi. L'EDTA sale bisodico, per le

Come per la pulitura laser, anche in questo caso era stato effettuato un trattamento progressivo, per cui l'impacco era stato posizionato per un intervallo di tempo di 30 minuti e poi rimosso, e riposizionato successivamente più volte per ottenere così tre diversi livelli di pulitura (Figura 30).



Figura 30: l'area sottoposta a trattamento di pulitura chimica

sue proprietà di complessare il calcio presente nelle croste e per la sua buona solubilità (migliore del sale tetrasodico), viene impiegato nell'impacco AB 57 (formulazione dell'I.C.R. di Roma). È inoltre un forte complessante di moltissimi cationi metallici, come il ferro ed il rame; questa proprietà può essere sfruttata per la rimozione di macchie di ruggine o di verderame da superfici lapidee, legno, intonaci, ecc. (http://www.ctseurope.com/depliant/%7BDF4ABF9A-5B9F-465D-98E8-4E1599440F0E%7D_Pagine%20da%204.1%20pulitura%20per%20impacchi%20-%20reagenti-95.pdf) (ultimo accesso 14/12/2013)

Durante tutte le fasi di pulitura, sia chimica che laser, con il metodo micro-fotogrammetrico, erano state acquisite più immagini della superficie trattata.



Figura 31: il sistema durante la fase di acquisizione delle immagini

Come dimostrato dalle prove di laboratorio, e dato che le condizioni del cantiere lo permettevano, era stato scelto di acquisire la superficie alle condizioni ritenute migliori (*Figura 31*): posizionamento della camera alla distanza di 320 mm dalla superficie, *step* di acquisizione delle immagini impostato a 16 mm (32 mm *baseline*).

Date le particolari dimensioni dell'area indagata, è stato scelto di non acquisire un'unica "tripletta", ma una "strisciata" costituita da 5 cinque scatti della macchina fotografica.

Questo ha portato alla generazione di tre singoli modelli che sono stati successivamente mosaicati tra loro in un unico modello (*Figura 32*).

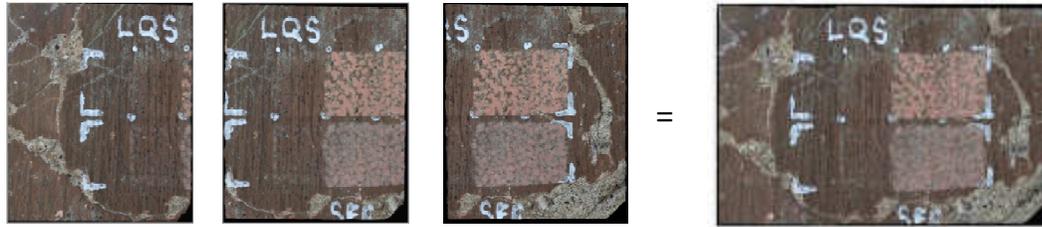


Figura 32: i tre modelli generati, mosaicati in uno unico

Come precedentemente detto, le fasi di acquisizione hanno seguito quelle della pulitura, ottenendo così quattro modelli a tempi diversi (T_0, T_1, T_2 e T_3) che sono stati successivamente sovrapposti tra loro al fine di valutare le modificazioni sulla superficie.

Scelto un piano di riferimento comune a tutti i modelli (UCS), sono stati generati i singoli DEM; per valutare le modifiche della superficie dopo gli interventi di pulitura, chimica e laser, è stato scelto di confrontare i profili di rugosità al tempo zero, non trattato, e al tempo tre, dopo i trattamenti.

Scelta una direzione lungo l'asse Y, sono stati calcolati i valori in quota della superficie e generati i profili di rugosità. In Figura 33 vengono riportati i grafici ottenuti:

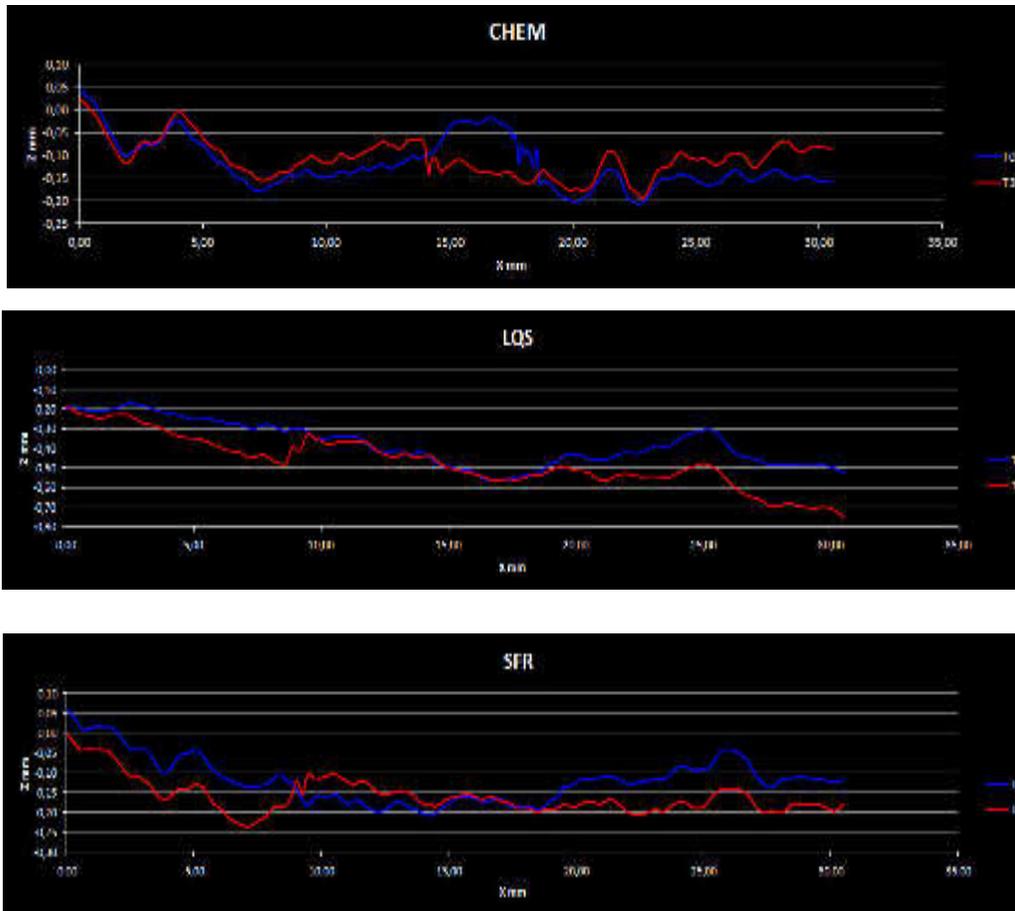


Figura 33: i grafici per il confronto della rugosità superficiale prima e dopo il trattamento

Come si può osservare, in tutti i casi si è riscontrato un abbassamento in quota della superficie causata dagli interventi di pulitura.

Successivamente i tre interventi sono stati confrontati tra loro, e in Figura 34 si riporta il grafico relativo.

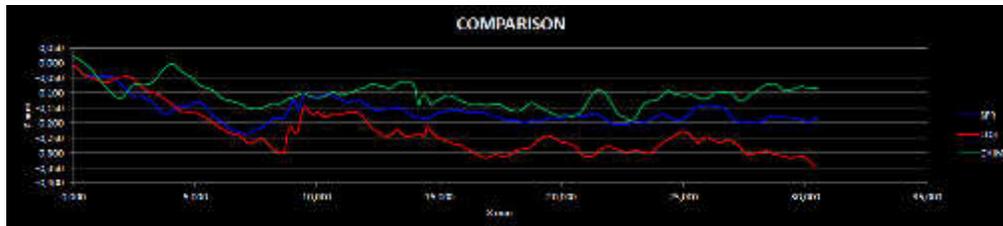


Figura 34: il grafico comparativo dei tre trattamenti

Si nota come la pulitura chimica e quella effettuata con il laser del tipo SFR abbiamo lo stesso andamento, al contrario quella effettuata con laser LQS, risulta avere un andamento meno omogeneo, tendendo a formare degli “scalini” sulla superficie.

Questo tipo di andamento può essere attribuito al fatto che l’impulso del laser in modalità LQS è molto breve con un effetto fotomeccanico molto forte, questo fa sì che la patina venga rimossa a *spot*.

Al contrario nel caso del laser utilizzato in modalità SFR, la durata dell’impulso è molto più lunga e l’effetto fotomeccanico meno intenso e dunque la patina è stata assottigliata e rimossa gradualmente, lo stesso effetto che si può notare con una pulitura chimica.

Considerato l’errore del sistema nella stima delle quote della superficie, i valori in assoluto riportati nei grafici non sono da considerarsi affidabili, ma solo come confronto relativo tra le varie misure.

In conclusione possiamo dire che il metodo micro-fotogrammetrico non può certo essere utilizzato per una valutazione quantitativa della

patina rimossa dalla pulitura, sia questa di tipo chimico che laser, quanto può esserlo una osservazione del campione al microscopio.

Tuttavia può fornire una documentazione obiettiva della patina rimossa durante i vari trattamenti, e come questa rimozione sia proceduta nel corso dell'intervento, e dare informazioni qualitative sull'andamento delle fasi di pulitura che possono aiutare il restauratore nella valutazione dell'intervento.

4.1.2 La micro-fotogrammetria per il monitoraggio delle lesioni

Nell'ambito del monitoraggio si vuole qui proporre una ulteriore applicazione del metodo micro-fotogrammetrico, il monitoraggio dell'andamento nel tempo di una lesione, dovuta a fenomeni sismici, presente sulla facciata Nord della Pieve di San Gavino Adimari (*Figura 35*), nel Comune di Barberino di Mugello (FI).

I dati di questo monitoraggio fanno parte della Tesi di Dottorato del Dott. A. Arrighetti, Archeologo, dottorando in "Archeologia Medievale" dell'Università degli Studi dell'Aquila.



Figura 35: la Pieve di San Gavino Adimari

Il lavoro svolto dal Dott. Arrighetti ha previsto l'analisi dell'edilizia medievale dal punto di vista archeosismico, ovvero la comprensione, attraverso l'archeologia dell'architettura, della storia sismica degli edifici

(Tutor del progetto di ricerca Prof. G. Vannini dell'Università degli Studi di Firenze).

Il rilievo effettuato con la metodologia oggetto di questo lavoro sulla Pieve di San Gavino Adimari, rientra in una più ampia

sperimentazione delle tecnologie fotogrammetriche per la registrazione e il monitoraggio degli edifici [29]-[32].

Il metodo micro-fotogrammetrico nella suddetta sperimentazione è stato di supporto e integrazione al rilievo architettonico dell'intero edificio effettuato dal Dott. Arrighetti con altre tecniche fotogrammetriche.

La Pieve si raggiunge percorrendo la strada che da Barberino di Mugello si snoda verso il passo della Futa, ed è situata in una semiconca riparata ad Est dal Poggio Ceccarone e degradante in un leggero pendio sulla Stura (*Figura 36*).

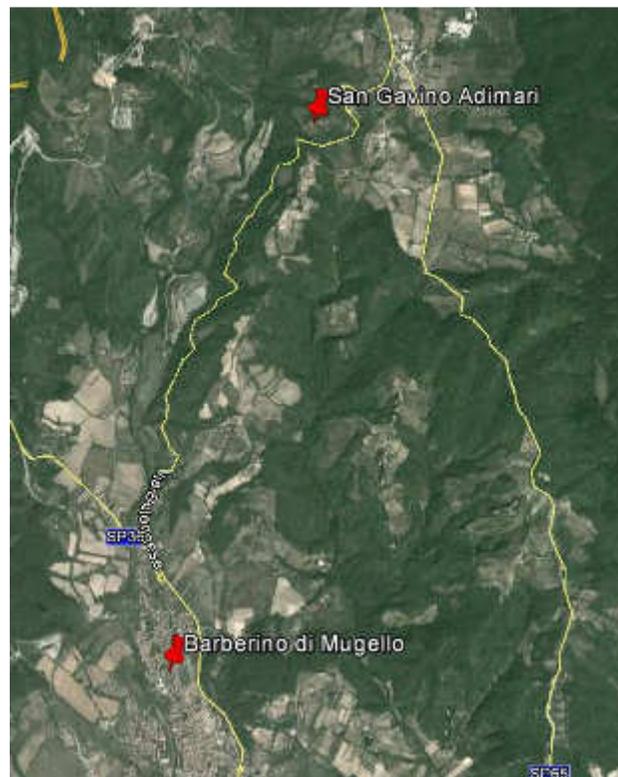


Figura 36: cartografia della zona della Pieve

La Pieve di San Gavino [33] viene citata per la prima volta in un antico documento del 1038, inserito nella prefazione delle *“Lezioni sulle antichità toscane e Specialmente della Città di Firenze”* di Giovanni Lami²³, in cui viene riportata la notizia dell’acquisto, da parte del Monastero di S. Miniato al Monte, del padronato della chiesa di S. Martino Adimari, posta nel piviere di S. Gavino Adimari; si può dunque dedurre che la Pieve sia molta antica e certamente anteriore all’anno Mille.

Una scritta presente sull’architrave della porta della facciata (A.D. MCCLXII MENSE JULII FUIT INCEPT) fa riferimento ad un probabile parziale rifacimento nel 1262. Nel XV secolo la pieve passò sotto il patronato dei Medici, il cui stemma è ancora visibile sulla sommità della sua facciata.

Nel 1542 il territorio del Mugello fu colpito da un forte terremoto che distrusse o danneggiò gravemente circa 3000 edifici sacri e profani.

²³ Nato a Santa Croce sull'Arno nel 1697, si laureò in legge a Firenze proseguì i suoi studi in filosofia e greco. Lavorò a Genova come bibliotecario nella biblioteca Pallavicini per poi trasferirsi a Vienna e a Parigi; dopo l'esperienza parigina compì molti viaggi che lo portarono in Olanda e in Svizzera.

Al suo ritorno a Firenze nel 1732, divenne il direttore della Biblioteca Riccardiana; fu professore di Storia Ecclesiastica presso l'università di Firenze e teologo consulente del Granduca Francesco Stefano.

Fu tra i fondatori della rivista *Novelle letterarie*, un settimanale di lettere e scienze pubblicato a Firenze dal 1740 al 1792, e suo unico redattore fino al 1769. Sepolto nella Chiesa di Santa Croce a Firenze, morì *"da filosofo" nella sua casa di Firenze, solo, senza medici né sacramenti, il 6 febr. 1770* (cfr. Firenze, Biblioteca nazionale, Tordi, 545.129, c. 13r: lettera di O. Maccari a R. Sellari, Firenze, 10 febr. 1770).

Anche la Pieve di S. Gavino subì il forte terremoto che la ridusse ad un cumulo di macerie; Cosimo I ne ordinò la ricostruzione, ma la volle più grande della precedente, con tre navate sorrette da colonne.

Probabilmente la ricostruzione avvenne utilizzando i materiali recuperati dalla vicina chiesa di San Martino Adimari. Nel XVIII secolo la chiesa, che aveva avuto nella metà del Cinquecento Benedetto Varchi come commendatario, fu interessata ad una vasta campagna di restauri, che ne mutò radicalmente l'aspetto, soprattutto all'interno.

Esternamente l'edificio si presenta con una facciata a capanna, sulla quale si apre una porta d'ingresso ed una finestra dalle linee settecentesche, posta entro una cornice circolare che segna probabilmente il perimetro di un ampio precedente rosone poi occluso. Costruita con piccole e regolari bozze di alberese con inserzioni di serpentino, la chiesa è conclusa da una scarsella rettangolare sulla quale si erge il poderoso campanile. L'interno presenta l'aspetto che gli fu dato nel XVIII secolo e costituisce un interessante e prezioso esempio di decorazione di gusto "rococò", avvertibile in modo particolare nei capitelli dei pilastri che dividono la navata centrale dalle due laterali, negli archi che si aprono nella pareti perimetrali e nell'altare maggiore, tutti elementi dotati di decorazioni eleganti e leggere.

La lesione oggetto del monitoraggio è posta sulla facciata laterale Nord della Chiesa, in prossimità della facciata principale.

Il monitoraggio ha previsto due differenti fasi di ripresa a distanza di circa nove mesi l'una dall'altra.

La prima acquisizione, da considerarsi come tempo zero (T_0), è stata effettuata nel Dicembre del 2011; in questa occasione sono stati apposti due *target*²⁴ per facilitare le riprese successive per l'individuazione dell'area acquisita.

Durante la prima campagna di acquisizioni si è provveduto ad acquisire l'intera area della lesione con un obiettivo 28 mm in modo da documentare una zona più ampia e poter ricontestualizzare le riprese effettuate con obiettivo macro 60 mm.

²⁴ Nel caso specifico di San Gavino Adimari, si è scelto di usare come *target* due pallini di piombo da pesca, incollati sulla superficie con una colla in gel.

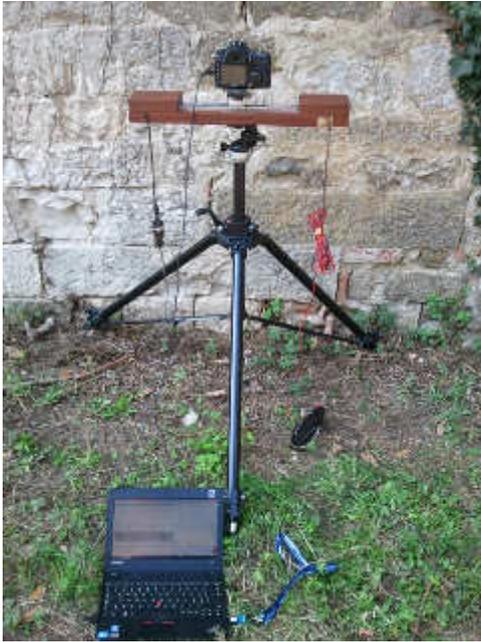


Figura 37: la strumentazione durante le fasi di acquisizione delle immagini

Montata la strumentazione su cavalletto fotografico (*Figura 37*), la camera, equipaggiata con obiettivo 28 mm, è stata posta a una distanza di circa un metro; il sistema con tale configurazione non è in grado di fornire automaticamente la distanza tra il sensore della camera e la superficie da acquisire, dunque la misura è stata effettuata attraverso un comune misuratore laser facilmente reperibile in commercio.

Posta la strumentazione in bolla si è provveduto all'acquisizione delle immagini per la generazione del modello: l'area della lesione è stata divisa in due partizioni, alto e basso, per ciascuna è stata acquisita una tripletta con *step* di ripresa pari a 130 mm, questo ha portato alla generazione di due singoli modelli, mosaicati tra loro per ottenere un unico modello (*Figura 38*).

Quando si parla di modelli mosaicati tra loro, si intende l'allineamento dei singoli al fine di ottenere un modello unico.

Per fare questa operazione è importante che i singoli abbiano tra loro una buona parte di sovrapposizione, ovvero che una zona per almeno il 50%, sia riconoscibile su entrambi i modelli.

Si è proceduto quindi alla ricerca dei punti omologhi (*Figura 39*), ovvero quei punti che sono riconoscibili su entrambi i modelli: questi devono essere in numero minimo di cinque e, possibilmente, ben distribuiti sulla superficie.



Figura 38: il modello 3D dell'area della lesione, realizzato con l'obiettivo 28mm, con la sovrapposizione dei modelli realizzati con l'obiettivo macro

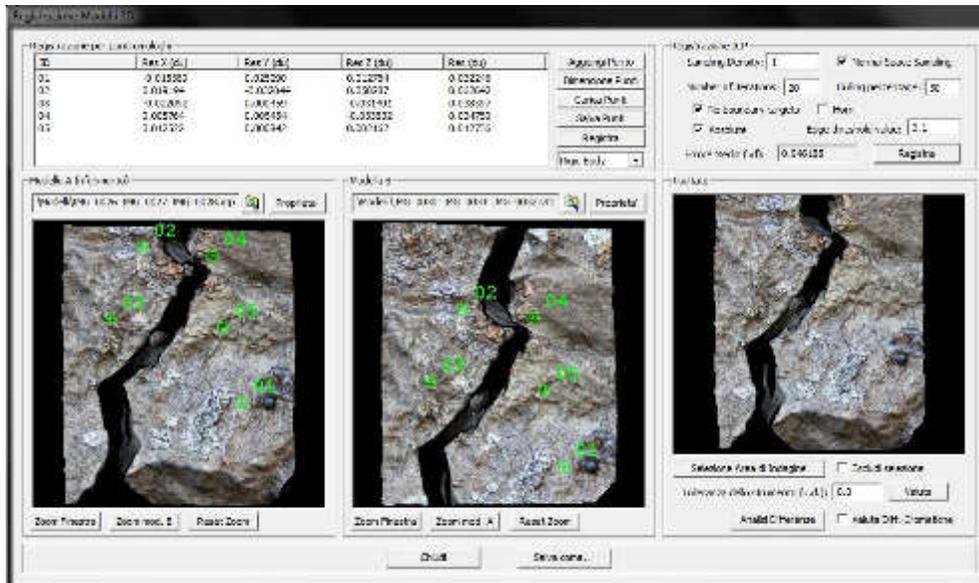


Figura 39: Schermata per la ricerca dei punti omologhi sui singoli modelli da allineare

Una volta definiti i punti omologhi i modelli sono stati rototraslati l'uno su l'altro in modo da far coincidere tra loro i punti omologhi; è da tenere in considerazione il fatto che tali punti vengono individuati manualmente dall'operatore e dunque soggetti a errori, è però possibile controllare questa trasformazione facendo attenzione che lo scarto residuo tra le coordinate spaziali (XYZ) di ogni punto si mantenga molto basso (nell'ordine di 0.04 mm).

Le acquisizioni in dettaglio della lesione, sono state effettuate con obiettivo macro 60 mm, la strumentazione è stata spostata, avendo cura di rimettere nuovamente in bolla il cavalletto, a una distanza di 330 mm tra il sensore e la superficie.

Per coprire l'intera superficie sono state acquisite quattro triplette, che hanno portato alla generazione di altrettanti modelli

tridimensionali, partendo dall'alto della lesione e spostandosi verticalmente verso il basso, abbassando di volta in volta la testa del cavalletto, avendo cura di controllare, al momento dell'acquisizione, che la strumentazione fosse ancora in bolla.

I modelli così ottenuti sono stati successivamente mosaicati tra loro per ottenere un unico modello tridimensionale (*Figura 40*).

La seconda campagna di riprese, da considerarsi come tempo uno (T_1), ha avuto luogo nel Settembre del 2012; al fine di poter sovrapporre i modelli ottenute dalle due campagne di acquisizione, è stata posta particolare attenzione alle caratteristiche di acquisizione, riproponendo le stesse della prima campagna.

Anche in questo caso, data la conformazione della zona da acquisire, si è provveduto ad acquisire più triplette dall'alto verso il basso mosaicando successivamente tra loro i modelli acquisiti; l'individuazione della stessa area di ripresa è stata facilitata dai *target* posizionati durante la prima campagna di misure.

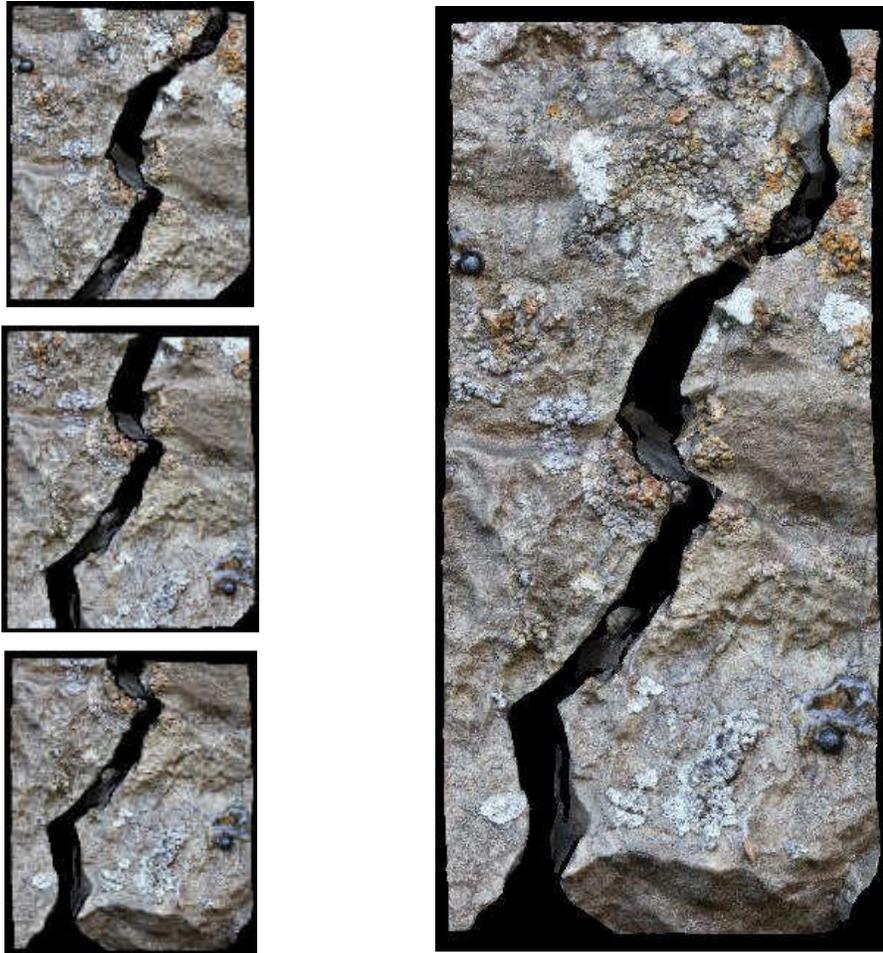


Figura 40: a sinistra i singoli modelli, a destra l'intera area ricostruita

Dopo la fase di acquisizione, generazione e allineamento dei singoli modelli, si è proceduto alla fase di analisi; così il T_0 e il T_1 sono stati allineati al modello generale della superficie, per contestualizzare la zona della lesione, e poi successivamente allineati tra loro.

Allineando i modelli l'uno sull'altro, è stato possibile determinare un unico UCS (*User Coordinate System*) a cui fanno riferimento tutte le quote in direzione X, Y e Z, in modo da poter controllare eventuali

modificazioni nelle tre direzioni (spostamenti, perdita o accumulo di materiale, ecc.).

Scelto un comune UCS sul modello T_0 attraverso una semina di punti sulla superficie, sono stati generati i DEM (*Digital Elevation Model*) di entrambi i modelli; questa operazione ha permesso di ottenere una stima automatica da parte del *software* dei valori massimi e minimi delle quote sulla superfici lungo l'asse zeta (*Figura 41*), inoltre dopo la generazione del DEM è stato possibile estrarre profili di rugosità della superficie lungo direzioni scelte ed individuate tramite una polilinea.



Figura 41: da sinistra a destra due diverse rappresentazioni del DEM, gradiente e geografica, e la relativa scala

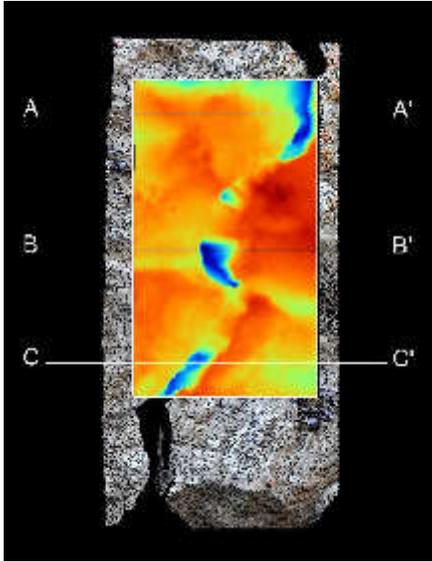


Figura 42: individuazione dei profili sulla superficie del modello

Per verificare se la lesione oggetto del monitoraggio avesse o meno subito modificazioni nel tempo, sono state tracciate tre polilinee sulla superficie (AA', BB', CC') dall'alto verso il basso (Figura 42), la sovrapposizione dei modelli ha garantito che i profili estratti sia a T_0 che a T_1 fossero gli stessi e dunque perfettamente sovrapponibili.

Le coordinate dei singoli profili sono state esportate in formato testo in modo da poter essere utilizzate con altri *software* che permettessero la loro elaborazione grafica. I grafici ottenuti sono stati sovrapposti per osservare la presenza di modificazioni della superficie (Figura 43).

É stato possibile osservare piccole variazioni di quota sia positive (da considerare come accumulo di materiale sulla superficie) sia negative (perdita di materiale), ma tali variazioni rientrano nell'ordine dell'errore del sistema e quindi non sono da considerarsi significative. C'è da aggiungere che, le variazioni che si possono leggere in direzione Z per la profondità della lesione, non sono da tenere in considerazione; il sistema, infatti, non è in grado di valutare la reale

profondità della fessurazione perché non riesce a catturare nell'immagine il fondo della stessa, e dunque, nella generazione del modello, tende a rigenerare la superficie approssimandola ai punti più vicini. Per questo tipo di monitoraggio, sono da considerarsi significative le variazioni subite lungo il piano XY che, come risulta dai grafici, sono rimaste invariate nel corso dell'anno.

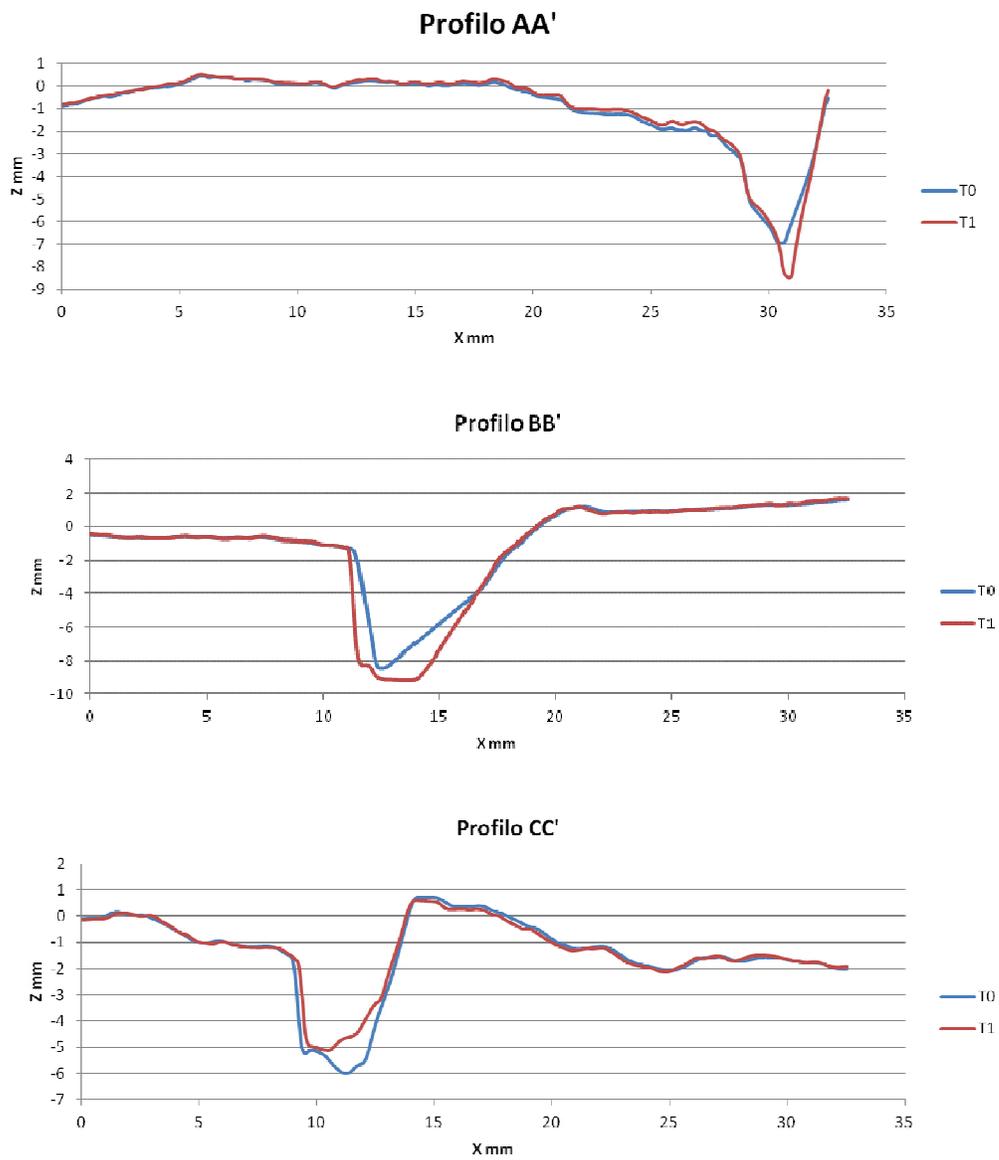


Figura 43: grafici della sovrapposizione dei profili delle superfici acquisiti a T0 e a T1

I modelli T_0 e T_1 , sono stati visualizzati all'interno del programma *ScanView*^{®25}, che permette la visualizzazione del formato *.vtp* dei modelli generati e la loro misurazione. In questo modo è stato possibile verificare che la distanza tra i *target* posizionati sulla superficie sul piano XY, non è variata durante il periodo di monitoraggio (*Figura 44*).

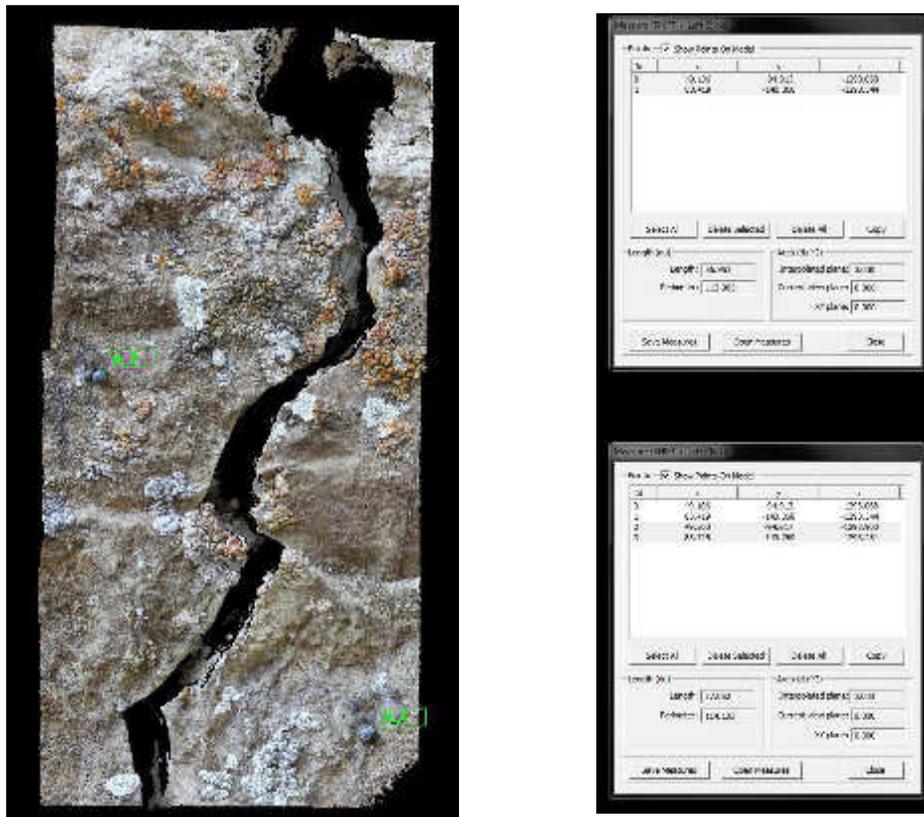


Figura 44: a sinistra il modello della lesione, a destra la distanza tra i target a T_0 e T_1

²⁵ Visualizzatore gratuito scaricabile online dal sito della Menci Software (www.menci.com) previa iscrizione online.

4.2 Applicazioni a fini documentativi

Il metodo micro-fotogrammetrico è stato anche utilizzato a fini documentativi per l'acquisizione e la ricostruzione di oggetti di piccole e medie dimensioni; gli oggetti così ricostruiti possono offrire un contributo significativo nel campo della conservazione e catalogazione dei Beni Culturali.

I modelli virtuali possono essere distinti in modelli di *studio*, che visualizzano una situazione futura, modelli di *documentazione*, che mostrano l'esistente, e modelli *ricostruttivi*, che visualizzano una situazione ipotetica.

Negli ultimi due casi i modelli sono stati definiti *esibitivi* [34] e la loro funzione è quella di superare i limiti dei disegni e delle immagini bidimensionali, mentre le applicazioni possono variare, da applicazioni di carattere scientifico ad altre di carattere divulgativo.

In letteratura è ben documentato, nei diversi periodi storici, l'uso di calchi e ricostruzioni fisiche di opere d'arte per la loro documentazione o per il loro trasferimento dal contesto originale in musei; allo stesso modo, la rappresentazione digitale in tre dimensioni, se ben eseguita, garantisce la corrispondenza con l'originale, la misurabilità delle sue parti offrendo inoltre una vasta possibilità di interazione derivante dalla sua natura digitale [35].

Molte sono le motivazioni che negli ultimi anni hanno spinto all'utilizzo del modello 3D, sia a fini divulgativi che scientifici, sia per

la realizzazione di repliche digitali per la catalogazione, il restauro e la riproduzione. Tra queste è possibile sottolineare: l'opportunità di esaminare l'oggetto anche da punti di vista diversi da quelli possibili nel suo contesto originale, ricontestualizzare l'oggetto nel suo ambiente naturale o permetterne la fruizione al grande pubblico come, ad esempio, nel caso di oggetti appartenenti a collezioni private [36].

4.2.1 Busto policromo di Ugolino Martelli

La micro-fotogrammetria è stata applicata al rilievo del busto in terracotta policroma di Ugolino Martelli (*Figura 45*), recentemente sottoposto a un intervento di restauro, conservato nel Museo di Casa Martelli a Firenze.



Figura 45: il busto in terracotta policroma di Ugolino Martelli

Questo busto figura senza attribuzione nell'inventario dell'eredità Martelli (1986), dove è indicato come il ritratto di Monsignor Ludovico di Ugolino Martelli (1451-1496), canonico della Chiesa Metropolitana fiorentina. Spetta ad Alessandra Civai (1990) il merito di avervi riconosciuto il ritratto in terracotta di Ugolino di Luigi Martelli (1491-1517) ricordato in un libro di debitori e creditori di suo fratello Luigi di Luigi Martelli (1494-1580).

Questo manoscritto fu reso noto da John Kent Lydecker nella tesi di dottorato del 1987, edita nel 1989. Lydecker dedicò un capitolo agli arredi dell'abitazione di Luigi Martelli in via degli Spadai (l'odierna Via Martelli), basato su un attento spoglio dei suoi libri contabili.

Tra le opere d'arte commissionate da Luigi, Lydecker segnalò un busto in terracotta che ritraeva il fratello Ugolino Martelli (1491-1517), vescovo di Narni, ricordato nel libro contabile per il periodo tra il 1517 e il 1523. In questo libro sono registrati pagamenti fatti il 10 aprile 1518, il 30 ottobre 1518, 1 dicembre 1518, il 9 gennaio 1519 e il 4 maggio 1519 a *Ghoro ischultore*, per un totale di 4 fiorini e 2 denari. Il causale, non specificato nei primi quattro addebiti, è indicato chiaramente nell'ultimo: *E a dì 4 di maggio 1519 lire 7, soldi 20 piccioli, sono per resto d'una testa di terra della impronta della buona memoria di monsignor di Narnii vescovo detto de Martelli mio fratello*. La stessa causale è indicata nell'accredito fatto sulla pagina di fronte: *Ghoro ischultore de avere fiorini 4 soldi - denari 2 d'oro li quali sono per fattura d'una testa e ritratto della buona memoria di monsignor Ugholino de Martelli mio fratello vescovo di Narnii di terra cotta [...]*. È ripetuto anche nell'elenco delle spese sostenute da Luigi dopo la morte del fratello: *E deon dare fiorini 4.-.2 d'oro E sono che tantj se ne dette a Ghoro ischultore per fatura d'una testa di terracotto d'un ritratto del vescovo mio fratello buona memoria posto avere, detto Ghoro in questo 63*. La base lignea sembra eseguita in un momento successivo, forse verso la fine del secolo XVI, visto che la forma accartocciata dello scudo con l'arme Martelli è tipica di quel periodo.

Date le dimensioni dell'opera, al fine di acquisirla nella sua interezza, è stato deciso di utilizzare un ottica Canon EF28 mm f/2.8.

Mantenendo fermo il cavalletto, sul quale era stata montata la barra con la camera, si è ruotato il busto di 360° cercando di mantenere, durante l'acquisizione delle singole triplette, la maggior area di sovrapposizione possibile.

Quando si rilevano superfici o modelli complessi, è buona regola acquisire un numero di triplette sovrabbondante rispetto alle reali necessità, perché non sempre è possibile ritornare sul posto o controllare che le immagini acquisite siano idonee alla ricostruzione del modello tridimensionale.

Per ogni lato del busto sono state effettuate quattro distinte fasi di acquisizione: una tripletta per la zona del basamento, una per la zona centrale del busto e delle braccia, una per la zona del petto e del collo e un'ultima acquisizione per il viso e la testa. A questo proposito è stato deciso di inclinare, di volta in volta, la testa del cavalletto di circa ± 20 gradi, per riuscire ad acquisire anche le zone in sottosquadro.

Una fase di acquisizione a se stante ha riguardato la zona del cappello.

Le singole triplette sono state generate con uno *step* di 20 px, un punto tridimensionale ogni 20 px dell'immagine, in questo caso infatti, acquisendo le triplette con un obiettivo 28 mm, elaborando le immagini con uno *step* più basso, si otteneva un modello con una elevata rugosità superficiale (*Figura 46*).



Figura 46: il modello del volto generato a risoluzioni diverse: a sinistra 10 px a destra 20 px, si noti come la zona destra risulti molto più rugosa nell'immagine di sinistra

Una volta generati i modelli sono stati esportati all'interno del programma *ZMap*[®], e mosaicati tra loro per ottenere un modello unico dell'intero lato (*Figura 47*).

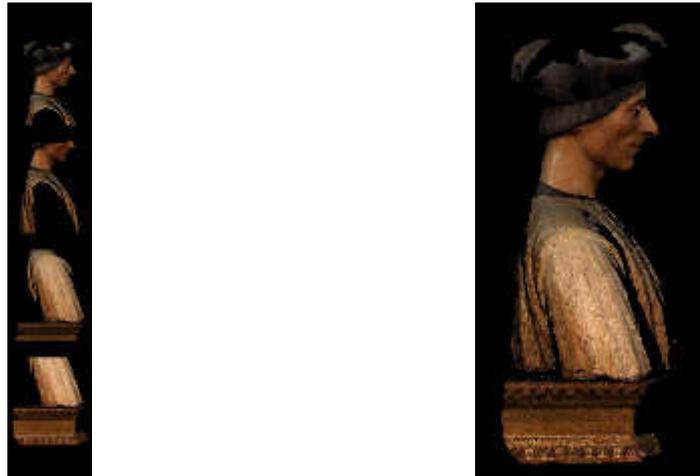


Figura 47: a sinistra i singoli modelli del lato del busto, a destra l'intero modello del lato ottenuto tramite l'allineamento dei singoli

L'allineamento di tutti i lati, risulta di difficile gestione all'interno del programma *ZMap*[®], si è scelto dunque di utilizzare un altro programma che invece permette una più facile gestione dei modelli tridimensionali.

MeshLab^{®26}, è un programma *open source*, sviluppato presso il Visual Computing Lab dell'ISTI-CNR di Pisa, per l'allineamento di scansioni 3D, e fornisce una serie di strumenti per l'*editing*, la pulizia, il *render*, ecc. di questo tipo di superfici.

Lo svantaggio di questo programma è il fatto che, durante la fase di allineamento dei modelli, non è possibile utilizzare la visualizzazione con *texture*, ma solo quello della superficie non *texturizzata*; questo rende particolarmente difficile l'allineamento di quelle superfici che risultano lisce ed omogenee, ma non rappresenta il caso del busto di Ugolino Martelli che invece offre sulla superficie molti punti riconoscibili (*Figura 48*).

²⁶ <http://meshlab.sourceforge.net/> (ultimo accesso 09/12/2013)

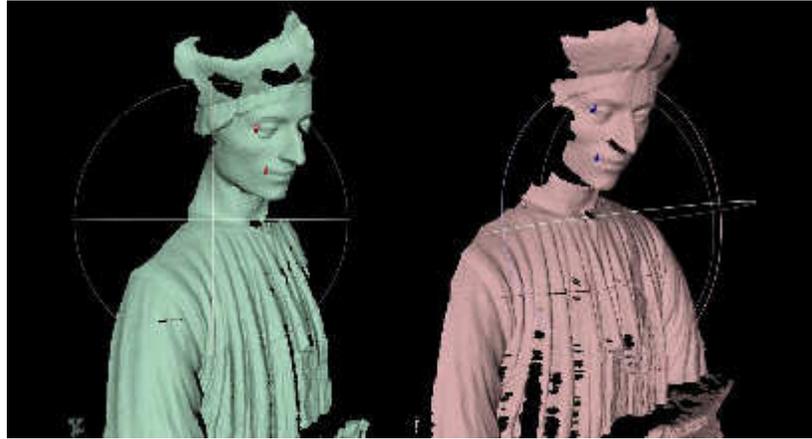


Figura 48: immagini della fase di allineamento di due modelli con MeshLab

Al termine della fase di allineamento, si ottiene un modello unico dell'oggetto (*Figura 49*)



Figura 49: a sinistra i singoli modelli allineati tra loro (in colore diverso), a destra il modello visualizzato con la texture

Le singole acquisizioni vengono “fuse” tra loro per ottenere un'unica *mesh*; per fare questo è però necessario eliminare le parti di sovrapposizione tra i vari modelli.

In queste zone, infatti, l'elevata quantità di informazioni può causare un eccessivo “rumore” sulla superficie rendendo il modello poco leggibile.

La ricostruzione di superfici 3D da modelli a nuvola di punti, è un problema molto studiato in *Computer Graphics*²⁷ [37] e presenta molte difficoltà: il campionamento dei punti della nuvola non è sempre uniforme, le normali ai punti della nuvola sono generalmente rumorose a causa di errori di registrazione, e alcune zone risultano prive di dati a causa della loro posizione (sottosquadri, o zone con modellati particolari) , della riflettività o del colore dei materiali (le zone di colore scuro o nere spesso non vengono ricostruite durante la fase di generazione della nuvola di punti).

I metodi di ricostruzione delle superfici 3D da modelli di punti tendono a ricreare la tipologia delle superfici, adattare con precisione i dati rumorosi e a riempire i “buchi” presenti nella nuvola che si creano per mancanza di dati.

Le metodologie più conosciute (*Delaunay triangulations*, *Voronoi*, *alpha shapes*), creano una superficie triangolata che interpola tutti i

²⁷ La *Computer Graphics* è la disciplina che studia le tecniche e gli algoritmi per la rappresentazione visuale di informazioni numeriche prodotte o semplicemente elaborate dai computer (Cfr. AA.VV, *Fondamenti di grafica tridimensionale interattiva*, Milano, McGraw-Hill, 2005)

punti della nuvola, ma in presenza di punti molto rumorosi la superficie risulta frastagliata e si rendono necessarie successive operazioni per renderla più *smooth* (levigata).

Altri metodi invece ricostruiscono direttamente una superficie che rappresenta la forma implicita dell'oggetto, considerando l'insieme dei punti o sottoinsiemi di essi che vengono, successivamente, legati tra loro.

MeshLab[®] fornisce una serie di algoritmi che permettono di ottenere dalla nuvola di punti che costituisce il modello, un'unica *mesh* in maniera automatica; nel caso del busto di Ugolino Martelli si è scelto di utilizzare l'algoritmo di *Poisson*²⁸ [38].

Questo algoritmo tiene conto di tutti i punti che costituiscono la nuvola in una sola volta, senza ricorrere a una partizione spaziale, riducendo molto il rumore superficiale e mantenendo un elevato livello di dettaglio (*Figura 50*).

Una volta creata la superficie si passa alla fase di *texturizzazione*, questa fase prevede la sovrapposizione di un'immagine digitale (*texture*) alla superficie di un oggetto tridimensionale.

Come abbiamo detto in precedenza, i modelli generati dal sistema micro-fotogrammetrico, hanno già associata una *texture* derivante dall'immagine fotografica, perché allora questa fase deve essere ripetuta?

²⁸ http://vr.tu-freiberg.de/scivi/?page_id=365 (ultimo accesso 09/12/2013)

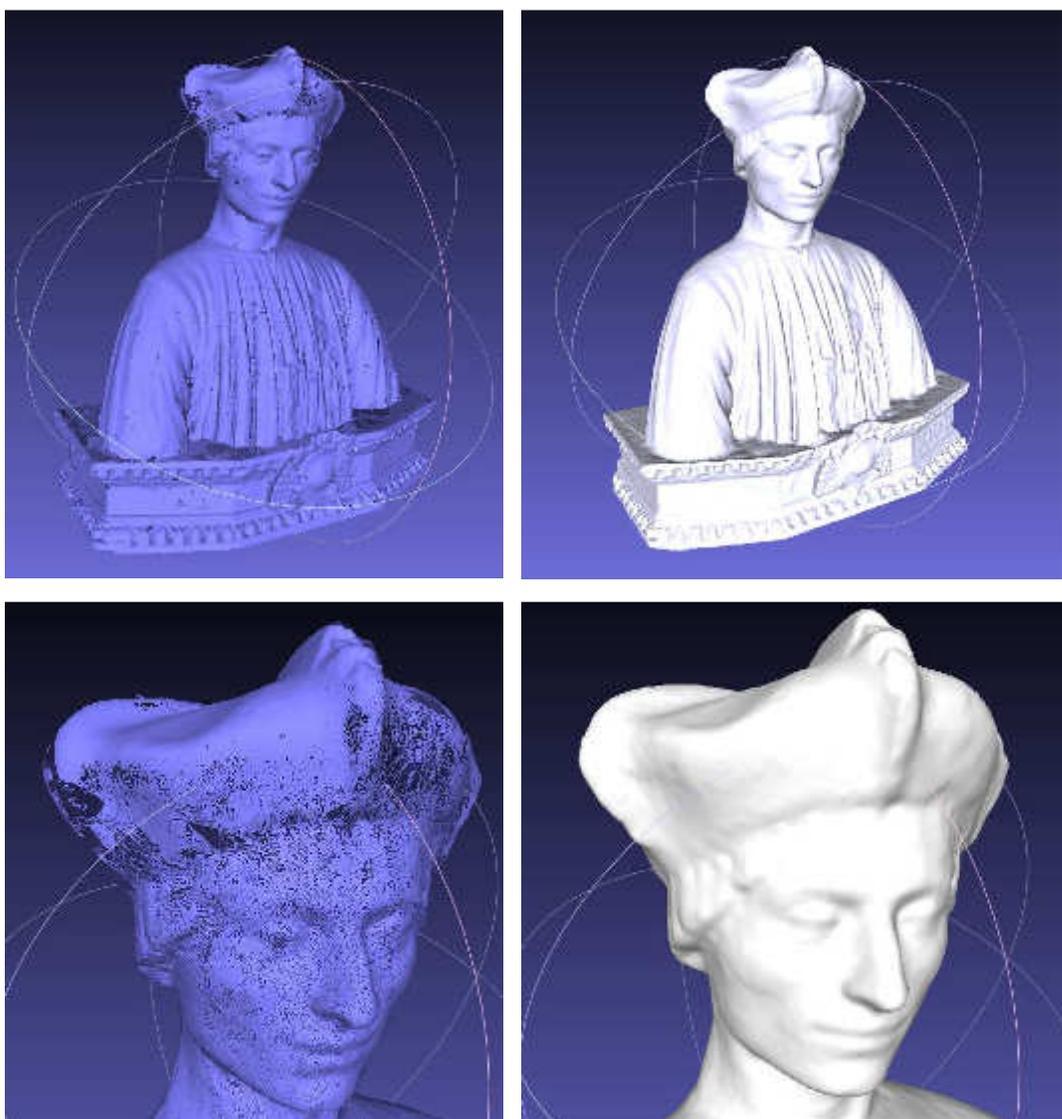


Figura 50: a sinistra il modello visualizzato come una superficie triangolata , a destra il modello dopo l'applicazione dell'algoritmo di Poisson, in basso un particolare del volto nella doppia visualizzazione

Durante l'acquisizione del busto di Ugolino Martelli, l'illuminazione non è sempre rimasta costante, e di conseguenza l'esposizione della foto è variata ed il risultato finale è quello di una *texture* non omogenea, che dona al modello un effetto "*camouflage*" (Figura 51).



Figura 51: due particolari della texture

I modelli generati dal sistema micro-fotogrammetrico, hanno un formato proprietario di estensione *.vtp*, e non possono essere visualizzati in altri programmi.

Per poterli esportare devono essere trasformati in altri formati, tra questi si è scelto di utilizzare il formato *.ply*, questo è una semplice descrizione dell'oggetto, ed è costituito da un'intestazione seguita da una lista di vertici e poi da una lista di poligoni.

L'intestazione specifica quanti vertici e poligoni sono nel file, e quali proprietà sono associate ad ogni vertice, come le coordinate spaziali (X, Y, Z), le normali e le informazioni del colore.

Questi tipi di formato vengono anche detti *color per vertex*, ovvero le informazioni sul colore che vediamo sul modello non sono date da una vera e propria *texture* ma bensì dalle informazioni di colore che ogni vertice porta con se, è ovvio quindi che la definizione del colore vada a diminuire perché il numero dei vertici sarà sicuramente inferiore al numero dei *pixel* presenti sulla *texture*.

Nell'ambito dei Beni Culturali, le informazioni cromatiche delle superfici acquistano una grande importanza sia in termini di conservazione (ad esempio le alterazioni cromatiche su un dipinto o su un affresco) che di divulgazione.

Visualizzare un oggetto nella sua interezza potendo apprezzarne anche le finiture cromatiche e i particolari della lavorazione, migliora la fruizione da parte del grande pubblico.

In termini di risorse di calcolo, a volte si hanno modelli costituiti da un elevato numero di triangoli, dunque molto pesanti e difficili da gestire per i processori comuni, proibitivi per un uso su internet; in questi casi è necessario "abbattere" drasticamente il numero dei triangoli che compongono la superficie per poter meglio utilizzare questi modelli.

La morfologia dell'oggetto non muta, ma certi particolari della superficie possono andare persi durante questa fase: la *texture*

impedisce la perdita di dettaglio in termini di materiali, colori e finiture della superficie permettendoci di utilizzare modelli costituiti da pochi triangoli, più leggeri e perfetti, ad esempio, per certe applicazioni in rete.

Il processo di *texturizzazione* in MeshLab avviene importando all'interno del progetto il modello dell'oggetto e l'immagine che si vuole proiettare sulla superficie (Figura 52).

Nel caso del Busto di Ugolino Martelli, il processo è stato totalmente manuale: l'immagine è stata allineata manualmente sul modello, quando il processo di allineamento è risultato soddisfacente si è proceduto alla proiezione dell'immagine sul modello, utilizzando l'algoritmo del programma che ottimizza l'allineamento durante il processo di proiezione.



Figura 52: alcune fasi dell'allineamento delle immagini sul modello

Una volta allineate tutte le immagini sul modello si è passati alla fase di texturizzazione vera e propria, le singole immagini sono state proiettate sul modello e il programma ha eseguito un *blending* del contributo di ognuna di queste in termini di colore ed esposizione.

La *texture* è stata salvata come file *.png* (Figura 53), su questo file è possibile intervenire con programmi di fotoritocco per correggere l'esposizione, applicare filtri ed altro per migliorare il risultato finale del modello.

Di seguito vengono riportate alcune immagini del modello finale (Figura 54).



Figura 53: l'immagine png della texture del modello



Figura 54: alcune immagini del modello texturizzato

4.2.2 Documentazione di reperti archeologici

Nell'ambito della documentazione, il metodo micro-fotogrammetrico è stato applicato anche su oggetti archeologici di piccole dimensioni [39] [40] .

Di seguito sono descritte le fasi di acquisizione, elaborazione e restituzione di un'ascia in rame (*Figura 55*) proveniente dall'insediamento eneolitico di S. Lorenzo a Greve, Firenze [41].



Figura 55: ascia in rame proveniente dall'insediamento eneolitico di S. Lorenzo a Greve, Firenze

La ricostruzione del modello dell'ascia è avvenuta utilizzando uno speciale piatto rotante, un accessorio del sistema che permette l'acquisizione a 360° di oggetti di piccole dimensioni.

Infatti, nel caso del busto di Ugolino Martelli, descritto nel paragrafo precedente, non è stato possibile utilizzare il piatto rotante a causa delle dimensioni e del peso dell'oggetto.

Ad un cavalletto fotografico è stata applicata una testa panoramica (Manfrotto 300N) sulla quale è possibile leggere ed impostare direttamente l'angolo di rotazione tra uno scatto ed il successivo (Figura 56).

Sulla testa è stato avvitato un piatto metallico con un diametro pari a 30 cm, sul quale è stato appoggiato l'oggetto che si desiderava acquisire; posizionata la camera e scelto il grado di rotazione, si è cominciato a scattare le immagini dell'oggetto ruotando il piatto gradualmente fino a compiere una rotazione di 360° (Figura 56).



Figura 56: a sx il piatto rotante montato sul cavalletto, a dx la testa panoramica

Questa operazione ha permesso di acquisire l'ascia senza doverla riposizionare ad ogni scatto.

Acquisite le immagini necessarie alla ricostruzione (il progetto di acquisizione delle immagini varia a seconda delle dimensioni dell'oggetto) si è proceduto alla creazione del modello.

Un apposito programma, *Z-Block*[®], permette di ricostruire automaticamente l'oggetto acquisito, rimontando i modelli generati nella giusta posizione spaziale.

Il risultato ottenuto dalle acquisizioni è un modello 3D con una vista a 360° e perfettamente misurabile, costituito da una nuvola di punti; ogni uno di questi è dotato di coordinate spaziali e coordinate RGB, che permettono una chiara lettura delle caratteristiche di colore e rugosità dell'oggetto.

Nel caso di oggetti difficili da posizionare sul piatto, che non possono mantenere una posizione verticale, come ad esempio l'ascia oggetto di questa indagine, possiamo utilizzare dei supporti "fai da te", come ad esempio rotoli di carta tagliati, basi di plastilina, ecc.

Le immagini dell'ascia sono state acquisite con un ottica 28 mm posizionando la camera a una distanza di circa 30 cm dall'oggetto ed impostando una rotazione di 10°, per un totale di 36 scatti fotografici in modo da effettuare una rotazione completa del piatto.

Anche per le acquisizioni con il piatto rotante, è sempre preferibile acquisire più immagini dell'oggetto al fine di coprire tutta la superficie e tutte le angolazioni e al momento dell'elaborazione è

compito dell'operatore scegliere gli scatti e i modelli migliori da utilizzare.

Come detto in precedenza, i modelli dell'ascia sono stati allineati automaticamente con il *software* dedicato, ottenendo un modello a nuvola di punti (*Figura 57*)

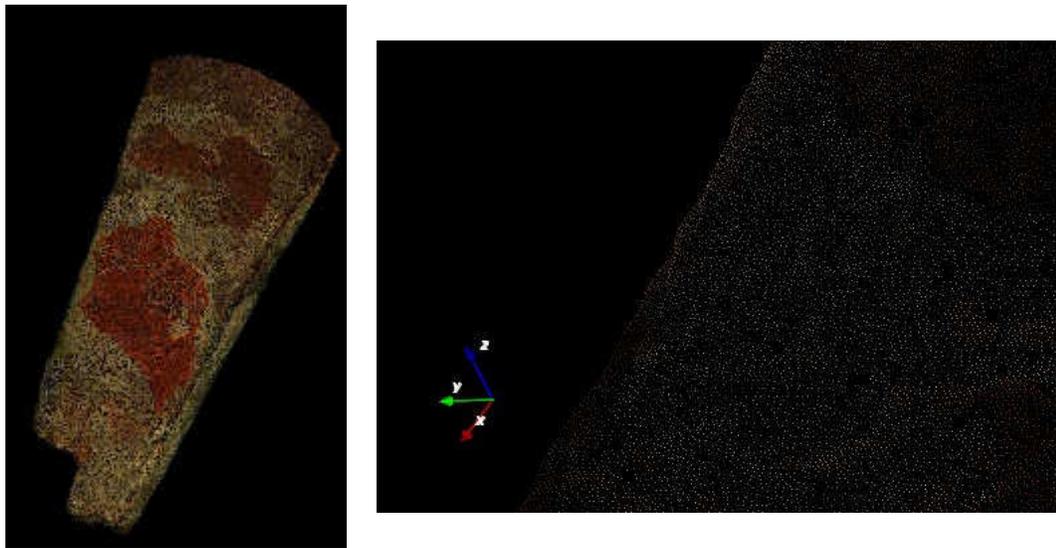


Figura 57: a sinistra il modello a nuvola di punti, a destra un particolare della nuvola

Come per il busto di Ugolino Martelli, i modelli allineati sono stati esportati, in formato *.ply*, all'interno di *MeshLab*[®], quindi i singoli modelli sono stati "ripuliti" delle parti di eccessiva sovrapposizione e trasformati in una *mesh* attraverso l'algoritmo di Poisson (*Figura 58*).

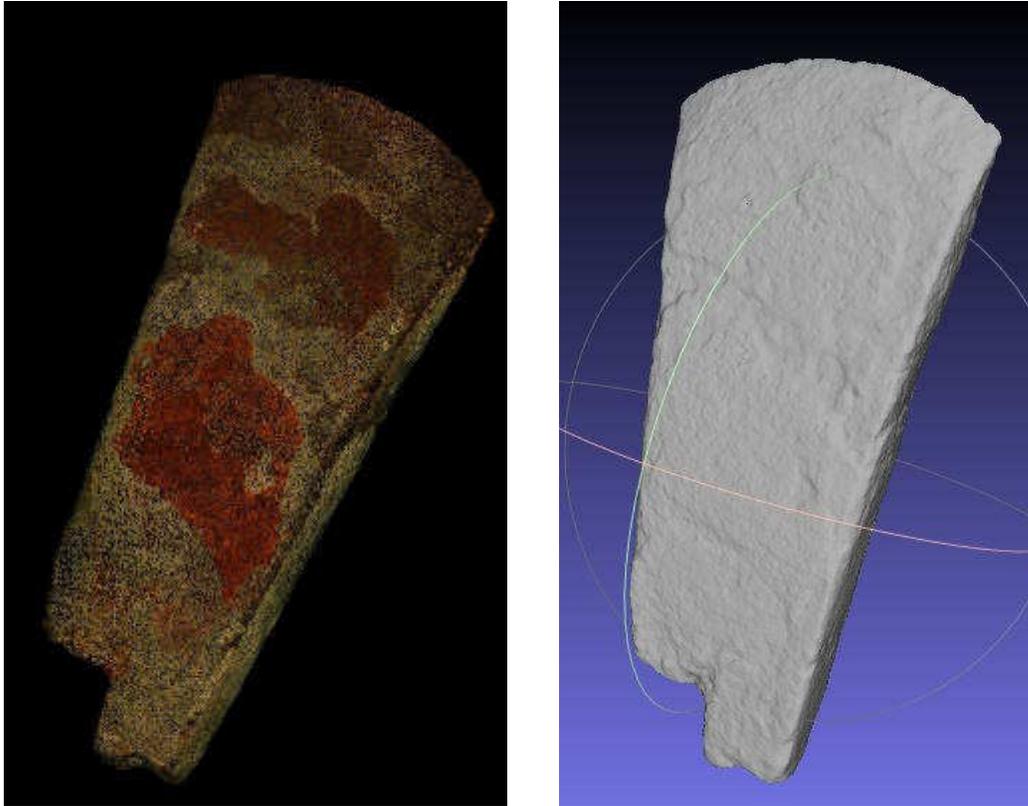


Figura 58: la doppia visualizzazione del modello: a sx la nuvole di punti, a dx la superficie (mesh) dopo l'applicazione dell'algoritmo di Poisson

Per il processo di testurizzazione del modello si è scelto di procedere in maniera diversa dal metodo utilizzato nel paragrafo precedente: nel caso dell'ascia in rame l'acquisizione dei modelli è avvenuta in laboratorio, in ambiente controllato dal punto di vista dell'illuminazione.

Dunque l'esposizione di ogni singolo scatto non ha subito modificazioni durante le fasi di acquisizione, eliminando così quell'effetto "camouflage" che era presente nell'esempio precedente.

Per procedere alla testurizzazione è stato deciso di applicare il *color per vertex*: ogni vertice/punto della nuvola porta con sé una serie di informazioni/attributi, come ad esempio la sua posizione nello spazio (coordinate X,Y,Z), le coordinate di colore RGB, le coordinate della *texture* (quando questa è presente) e molto altro ancora.

Il processo di *Vertex Attribute Transfer* utilizzato per “colorare” la superficie del modello, trasferisce le informazioni di colore di ciascun punto della nuvola sulla superficie del modello.

Il procedimento è semplice e meno laborioso di quello visto in precedenza: i due modelli, quella a nuvola di punti e la *mesh*, vengono aperti contemporaneamente all’interno del programma.

Dal menù *Filters>Sampling>Vertex Attribute Transfer* si sceglie la *Source mesh*, la nuvola di punti, e la *Target mesh*, la *mesh* di destinazione, infine si sceglie quali sono gli attributi che si vogliono trasferire da un modello all’altro (*Figura 59*).

A questo punto è stato possibile applicare il filtro, ottenendo così un modello con le informazioni di colore derivate dai punti della nuvola (*Figura 59*).

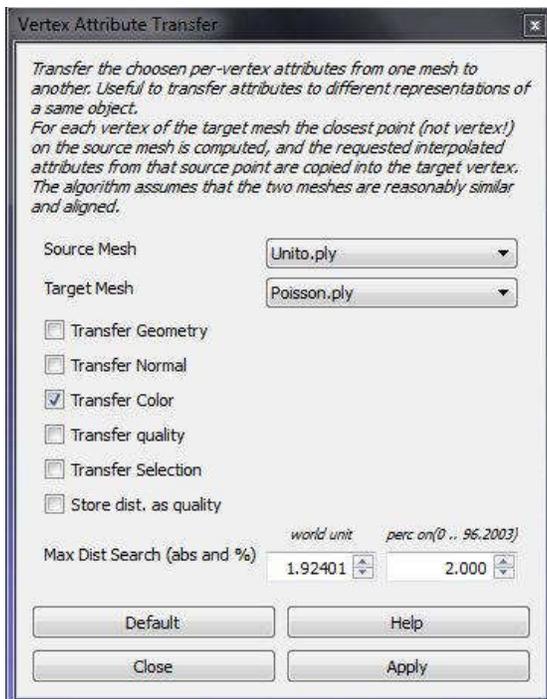


Figura 59: a sx il modello a nuvola di punti e la mesh sovrapposti, a dx il menù per il trasferimento degli attributi dei vertici. In basso due immagini del modello testurizzato. Sotto due viste del modello color per vertex

5. Conclusioni

Il presente lavoro ha permesso di valutare le effettive prestazioni del sistema nel campo della conservazione delle superfici di particolare interesse storico – artistico.

Lo studio delle migliori condizioni di ripresa e di elaborazione delle immagini, la messa a punto di una speciale routine in *Matlab*[®] per l'analisi dei dati e l'eliminazione dei problemi di allineamento tra la superficie acquisita ed il piano della camera, frutto della interazione di diverse competenze presenti nell'Istituto per la Valorizzazione e la Conservazione dei Beni Culturali, hanno consentito di migliorare le prestazioni del sistema riducendo notevolmente l'errore commesso lungo l'asse Z, sicuramente la misura più critica rispetto alla corrispondente misura planimetrica.

Con l'attuale configurazione del sistema (Canon EOS7D equipaggiata con obiettivo macro Canon 60 mm), le condizioni migliori di acquisizione delle immagini e della loro successiva elaborazione possono essere riassunte come segue:

- La miglior distanza di acquisizione delle immagini, laddove le condizioni di ripresa lo permettano, risulta essere compresa tra i 300 e i 330 mm, il miglior compromesso tra profondità di campo, dimensioni della superficie rilevata ed errore lungo l'asse Z;

- Scelta di diaframmi molto chiusi (da f/14 in su) per migliorare la profondità di campo dell'obiettivo;
- Scelta di una *baseline* (distanza tra il primo e l'ultimo scatto) pari ad 1/10 della distanza tra il sensore e la superficie da rilevare, avendo sempre presente i risultati che si vogliono ottenere in funzione della caratteristica della superficie;
- Elaborazione delle immagini per la generazione del modello tridimensionale, con uno *step* di risoluzione pari a 10 px, ottenendo una nuvola di punti densa e ben descrittiva della superficie;
- Utilizzo della routine in *Matlab*[®] per migliorare l'allineamento della superficie acquisita al piano di messa a fuoco della camera.

Queste operazioni ed i risultati ottenuti ci permettono di affermare che l'errore che si commette lungo l'asse Z, da considerarsi come limite massimo del sistema, risulta essere pari a **10 μm**.

L'errore commesso sul piano XY, se valutato in maniera automatica dal sistema, risulta invece più alto. Come abbiamo visto questo può essere imputato alla difficoltà del sistema di acquisire le aree laterali della superficie quando questa sia caratterizzata di spessori elevati (sopra 1 mm).

Questo problema può essere ovviato avendo cura di aumentare la distanza tra gli scatti in fase di acquisizione delle immagini, oppure

misurando le distanza sul piano XY manualmente con l'apposito programma cercando di essere più precisi possibili, in questo modo l'errore commesso è solo quello introdotto dall'operatore che, con l'esperienza, può essere ridotto al minimo.

Il sistema, nella nuova configurazione, è stato applicato su vari casi studio, superfici costituite da materiali diversi (marmo, pietra, dipinti murali, affreschi, ecc), e oggetti di dimensioni e caratteristiche geometriche differenti.

Le diverse applicazioni, sia nel campo del monitoraggio che in quello della documentazione, del sistema micro-fotogrammetrico hanno permesso di acquisire l'esperienza necessaria per trattare al meglio le diverse superfici, materiali costituiti e caratteristiche geometriche degli oggetti, in modo da ottenere sempre il risultato migliore.

Lo studio effettuato ha messo in luce come il sistema micro-fotogrammetrico possa essere d'aiuto per lo studio delle modificazioni superficiali dovute a fenomeni di degrado, alla valutazione di interventi di restauro o per il monitoraggio di trattamenti conservativi.

Rimane il fatto che l'esperienza acquisita negli anni da parte dell'operatore, aiuta a scegliere, di volta in volta, le caratteristiche migliori di acquisizione dell'immagini e il loro trattamento in fase di generazione ed elaborazione dei modelli tridimensionali.

È opportuno mettere in evidenza anche quelle che sono da considerarsi le criticità del sistema: innanzi tutto la "portabilità" dello

strumento che necessita di essere montato su un cavalletto che deve essere trasportato *in situ*.

La configurazione del sistema in cantiere, lo rende particolarmente idoneo allo studio di superfici poste in verticale, questo ci permette di lavorare in maniera più speditiva, per le superfici poste in orizzontale non sempre è possibile posizionare lo strumento alla giusta distanza.

Rimane ancora critico il problema dell'illuminazione: in questo senso è possibile utilizzare delle luci, posizionate in modo da non creare ombre sulla superficie che potrebbero falsare la ricostruzione del modello. Per questo sarebbe utile portare insieme alla strumentazione un sistema di illuminazione da utilizzare al momento dell'acquisizione dell'immagini, anche se non sempre è possibile avere corrente elettrica sul cantiere.

In conclusione si ritiene che il metodo micro-fotogrammetrico sia un metodo sicuro ed affidabile per la documentazione obiettiva dello stato di conservazione e per la valutazione di interventi di restauro di opere d'arte.

Da sottolineare infine che tale metodologia è totalmente non invasiva e facilmente trasportabile per effettuare misurazioni *in situ* per le opere oggetto di indagine diagnostica.

Bibliografia

[1] Koch M., Kaehler M., *Combining 3D laser-scanning and close-range-photogrammetry - An approach to exploit the strength of both methods*, in "Making history interactive: computer applications and quantitative methods in archaeology (CAA)" 37th international conference, Williamsburg, Virginia, United States of America, March 22 - 26, 2009

[http://www.caa2009.org/articles/Koch_Contribution278_a.pdf
ultimo accesso 09/12/2013];

[2] Remondino F., Guarnieri A., Vettore: *3D Modeling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning?*, Proceedings SPIE 5665, Videometrics VIII, pp. 216-225, San Jose (California), USA, February 2005;

[3] Remondino, F., Menna, F., *Image-based surface measurement for close-range heritage documentation*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, part B5-1, Beijing, China, pp.199-206, 2008;

[4] Remondino, F., Zhang, L., *Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI, part 3, pp. 117-123. ISPRS Commission III Symposium, Bonn, Germany, 2006;

- [5] Leifer J., *A close-range photogrammetry laboratory activity for mechanical engineering undergraduates*, in proceeding of “Frontiers in Education”, Volume: 2, pp. 7-12, 2003
[<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1264709>, ultimo accesso 19/12/2013];
- [6] Prattichizzo D., Mariottini G.L., Moneti F., Orlandesi M., Fei M., De Pascale M., Formaglio A., Morbidi F., Mulatto S., *La visione artificiale: controllo di qualità, fotogrammetria e realtà virtuale*, [<http://sirslab.dii.unisi.it/papers/others/VRQualitaLaterizi.pdf>, ultimo accesso 19/12/2013];
- [7] Xu J., Fang Z.P., Malcolm A. A., Wag H., *A robust close-range photogrammetric system for industrial metrology*, in “ICARCV”, IEEE, (2002), pp. 114-119
[<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1234806>, ultimo accesso 09/12/2013];
- [8] Andrés A. N., Pozuelo F. B., Marimón J. R., Gisbert A., *Generation of virtual models of cultural heritage*, in “Journal of Cultural Heritage” 13 (2012), pp. 103-106;
- [9] Appolonia L., Moltedo L., Picco R., Salonia P., *Innovative systems for assisted analysis and diagnosis*, in Proceedings of the XXI CIPA International Symposium AntiCIPAting the Future of the Cultural Past, Athens, 2007
[<http://cipa.icomos.org/index.php?id=63/>, ultimo accesso 19/12/2013];

- [10] Arrighetti A., Gilento P., Manganelli Del Fa R., Parenti R., Tiano P., *L'innovazione nella registrazione della struttura materiale. La sperimentazione di tecniche di rilievo e monitoraggio di costo limitate*, in "Governare l'Innovazione. Processi, strutture, materiali e tecnologie tra passato e futuro", Atti del Convegno di Studi Scienza e Beni Culturali XXVII, Bressanone 21-24 Giugno 2011, pp. 233-242;
- [11] Campana, S., Remondino, F., *Fast and detailed digital documentation of archaeological excavations and heritage artifacts*. Proc. of 35th CAA Conference (Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology), Berlin, Germany, April 2007, pp 36-42;
- [12] Girardi S., Cavulli F., Voltolini F., Rizzi A., Remondino F., Pedrotti A., Gonzo L., *Laser scanner e fotografia digitale per la modellazione e l'analisi di siti archeologici: il caso studio del Riparo Gaban*, in "Atti della 11° conferenza nazionale della Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali (ASITA)", Torino, 6-9 novembre 2007;
- [13] Gonzo, L., Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F., El-Hakim, S., *Multiple Techniques Approach to the 3D Virtual Reconstruction of Cultural Heritage*, 5th Eurographics Italian Chapter Conference 2007 - R. De Amicis and G. Conti (Editors), 14-16 Feb 2007, Trento, Italy;

- [14] Parenti R., Gilento P., Ceccaroni F., *Three-dimensional data and the recording of material structure*, in Atti 15^a Conferenza Nazionale ASITA - Reggia di Colorno 15-18 novembre 2011;
- [15] Remondino, F., *3D surveying and modelling of complex architectural sites and heritage objects. Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, in Disegnare con ISSN 1828-5961, Vol. 4, Numero 8, 2011
- [16] Rizzi, A., Voltolini, F., Remondino, F., Girardi, S., Gonzo, L., *Optical measurement techniques for the digital preservation, documentation and analysis of cultural heritage*. VIII Conference on Optical 3D Measurement Techniques - Gruen/Kahmen (Eds), Vol. 2, July 2007, Zurich, Switzerland, pp. 16-24;
- [17] Salonia P., Leti Messina T., Marcolongo A., Pozzi A., Scolastico S., *A multimedia application for exploitation and virtual fruition of ancient archaeological artifacts: the experience of the 2nd century Roman Balteus of Aosta*, in Proceedings from 14th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, Cypro, 2008;
- [18] Salonia P., Scolastico S., Marcolongo A., Leti Messina T., Pozzi A., *Three focal photogrammetry application for multi-scale and multi-level cultural heritage survey, documentation and 3D reconstruction*, in Proceedings from 22nd CIPA Symposium Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage, Kyoto, 2009 [<http://cipa.icomos.org/index.php?id=64>, ultimo accesso 10/12/2013];

- [19] Frediani P., Manganelli Del Fà R., Riminesi C., *Micro-fotogrammetria: una tecnica non invasiva per il monitoraggio degli interventi di conservazione*, in Arkos Scienza e Restauro, N°24, 2010, Nardini Editore, pp. 72-74;
- [20] Bracci S., Cantisani E., Fenelli L., Olmi R., Manganelli Del Fà, R., Magrini D., Penoni S., Picollo M., Priori S., Riminesi C., Sacchi B., Todaro C., *Applicazione di tecniche diagnostiche non-invasive e micro-invasive su dipinti murali: il caso studio della cappella di S. Antonio Abate della ex-Chiesa di S. Maria a Le Campora*, Technical Report. CNR-ICVBC, 2011;
- [21] Bracci S., Cuzman O.A., Ignesti A., Manganelli Del Fà R., Olmi R., Pallecchi P., Riminesi C., Tiano P., *Multidisciplinary Approaches for the Conservation of an Etruscan Hypogean Monument – Tomba Della Scimmia, Chiusi, Italy*, IV European Symposium on Religious Art, Restoration and Conservation, May 3-5, 2012, Iasi, Romania
- [22] Manganelli Del Fà R., Pallecchi P., Rescic S., Riminesi C., Tiano P., *Monitoraggio dei parametri ambientali e dello stato di conservazione dei manufatti lapidei*, in Arkos Scienza e Restauro, N° 28, 2011, Nardini Editore, pp. 63-67;
- [23] Rescic S., Tiano P., Fratini F., Manganelli Del Fà R., *The micro-sandblasting technique as a new tool for the evaluation of the state of conservation of natural stone and mortar surfaces*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 17:2, 2013, pp. 113-127;

- [24] Tapete D., Fratini F., Mazzei B., Camaiti M., Cantisani E., Riminesi C., Manganelli Del Fà R., Cuzman O., Tiano P., *Calcium carbonate crystallizations on hypogean mural paintings: a pilot study of monitoring and diagnostics in Roman catacombs*, EGU General Assembly 2012, Vol. 14, EGU2012-6118, 2012;
- [25] Tapete D., Mazzei B., Fratini F., Riminesi C., Manganelli Del Fa R., Cantisani E., Sacchi B., Cuzman O.A., Patrizi M.G., Scaletti L., Tiano P., *Monitoring Hypogeous systems affected by crystallization process among conservation needs, microclimate factors and accessibility to heritage*, in Conservazione e Valorizzazione dei siti archeologici – Approcci scientifici e problemi di metodo, Atti del Convegno di Studi Scienza e Beni Culturali XXVII, Bressanone 9-12 Luglio 2013, pp. 899-910;
- [26] Tiano P., Riminesi C., Bracci S., Cuzman O., Manganelli Del Fà R., Pallecchi P., Saiz Jimenez C., *Multidisciplinary approaches for the investigation of the hypogean, environments of the Etruscan Tomb "Della Scimmia" Chiusi, Italy*, International Congress Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage, 2-5 October, 2012, Santiago de Compostela, Spain;
- [27] AA.VV., *Dizionario del restauro. Tecnica diagnostica conservazione*, Cristina Giannini (a cura di), Firenze, Nardini Editore, 2010;
- [28] AA.VV., *Le tecniche artistiche. Ideazione e coordinamento di Corrado Maltese*, Azzate (Varese), Ugo Mursia Editore, 2006;

- [29] Arrighetti A., *Building Archaeology and Seismic Risk: the Mugello survey*, Proceedings of the XVII International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, Vienna (Austria) 5-7 November 2012
- [http://www.chnt.at/wpcontent/uploads/eBook_CHNT17_Arrighetti.pdf, ultimo accesso 19/12/2013];
- [30] Arrighetti A., Castelli V., Sessa M., *Sismicità e cinetiche di degrado strutturali. Il contributo dell'Archeologia dell'Architettura*, Atti del Convegno Internazionale di Studi Conservazione e Valorizzazione dei siti archeologici, 9-12 luglio 2013, Bressanone, pp. 551-560;
- [31] Arrighetti A., *Building Archaeology and seismic risk in the Mugello: from the collection of data to the documentation of historical buildings*, Proceedings of the Congreso Internacional sobre Documentación, Conservación y Reutilización del Patrimonio Arquitectónico *La Cultura del Restauro e della Valorizzazione. Temi e Problemi per un Percorso Internazionale di Conoscenza*, Madrid, 20-22 June 2013, pp. 269-276;
- [32] Arrighetti A., *Tecnologie fotogrammetriche e registrazione 3D della struttura materiale: dal rilievo alla gestione dei dati*, in *Archeologia e Calcolatori*, XXIII, Firenze, 2012, pp.251-264.
- [33] Cetarini M., Salvadori P., *Il Mugello*, Borgo San Lorenzo, ed. Parigi&Oltre, 1999;

- [34] Gavinelli C., *Storie di modelli espositivi e critici*, 1a ed., Firenze:Alinea, 1999;
- [35] Baracchini C., Brogi A., Callieri M., Capitani L., Cicognini P., Fasano A., Montani C., Nenci C., Novello R. P., Pingi P., Ponchio F., Scopigno R., *Interactive visualization of artwork's 3D digital reconstruction*, in: Rossi M., Salonia P. (a cura di), Midech '05. Multimedia.Information@Design for Cultural Heritage '05. Roma, Aracne Editrice, 2005, pp. 59-64;
- [36] Acidini C., Cappellini V., *Reale e virtuale nei musei: due visioni a confronto*. Bologna, Pitagora editore, 2008;
- [37] Scateni R., Cignoni P., Montani C., Scopigno R., *Fondamenti di Grafica tridimensionale interattiva*, Milano, McGraw-Hill, 2005;
- [38] Kazhdan M., Bolitho M., Hoppe H., *Poisson Surface reconstruction*, in "Symposium on Geometry Processing", pp. 61-70, Giugno 2006;
- [39] Algostino F., Bonora V., Manganelli Del Fà R., Tiano P., Tucci G., *Il contributo della modellazione 3D nella documentazione del restauro dei reperti archeologici*, in *Restaurando la storia. L'alba dei principi etruschi*. Catalogo della mostra, Cortona 18 novembre 2012 - 5 Maggio 2013. Tiphys Edizioni, 2012, pp. 123-125;
- [40] Manganelli Del Fà R., Riminesi C., *Metodo microfotogrammetrico per la catalogazione di reperti archeologici*, Atti del Seminario di Archeologia Virtuale, Roma, 5-6 Aprile 2011;

[41] Aranguren B., Perazzi P., Mariotti Lippi M., Minniti M., Mori Secci M., Pallecchi P., *S. Lorenzo a Greve: l'insediamento eneolitico*, Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana, Firenze, Vol. 4, 2008, pp. 98-121;

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale va alla mia Mamma Elide che, nonostante io volessi smettere di studiare già alla fine della Terza Media, mi ha sempre “impedito” di lasciare gli studi.

Ringrazio:

- *il Prof. Piero Frediani, che mi ha seguita con pazienza, insegnando a un Architetto a pensare in maniera scientifica.*
- *La Prof.ssa Grazia Tucci, che mi ha dato la possibilità di utilizzare altri sistemi di rilievo e di collaborare a progetti interessanti.*
- *L’Ing. Cristiano Riminesi, collega e mio referente scientifico, per la messa a punto delle routine in Matlab®, a dimostrazione che la collaborazione tra Ingegneri e Architetti, nonostante quello che si dica, può anche funzionare.*
- *Luciano Scaletti, per le misure sui provini usati per la sperimentazione.*
- *La mia amica e collega, la Dott.ssa Donata Magrini, che ha sopportato, più o meno pazientemente, i momenti di difficoltà e nervosismo che hanno caratterizzato quest’ultimo periodo.*

Ringrazio anche mio Padre Carlo, che penso sarebbe stato orgoglioso dei risultati che ho ottenuto, e con il quale avrei voluto “scontrarmi” sui temi di questo lavoro.