

Rilievo architettonico remote sensing della Fortezza della Verruca sui Monti Pisani, Toscana (Italia)

Giovanni Pancani^a, Matteo Bigongiari^b

^a Università di Firenze, Firenze, Italia, giovanni.pancani@unifi.it, ^b Università di Firenze, Firenze, Italia, matteo.bigongiari@unifi.it

Abstract

The paper describes the digital survey project of the Verruca fortress, a medieval fortress built on top of one of the peaks of the Pisan Mountains to control the valley of the Arno river; the fortress was fortified in modern times by the Florentines and was visited by important architects such as Giuliano da Sangallo and Leonardo da Vinci. Today the fortress is in a state of ruin, and recently a summer fire caused the loss of the vegetation that had massified around the building, thus allowing to program the analysis of the walls of the fortress to deepen its construction history and state of material and structural conservation. The fortress survey project integrates range based, image based and UAV technologies, focusing attention on the methodologies used to ensure the high morphological reliability of the data obtained from the survey, in a very complex area to reach: in fact the position of the Verruca fortress does not present optimal landscape conditions to plan measurement operations. The three-dimensional model obtained by the drone, which is necessary for the reconstruction of reliable textures, has been verified to be reliable compared to the laser scanner model. Highly reliable drawings were obtained which are useful for analyzing the state of conservation of the architecture; thanks to the use of the drone it was possible to measure points that were not accessible until now. The results of the survey made it possible to reconstruct graphical drawings that made it possible to deepen the architectural and historical analyzes on the fortress.

Keywords: remote sensing, Verruca, UAV, TLS.

1. Introduzione

Il contributo descrive il progetto di rilievo digitale della fortezza della Verruca, che si trova sulla vetta del Monte Verruca, sui monti pisani. Il progetto di rilievo digitale della fortezza della Verruca integra tecnologie di acquisizione dati range-based, image-based e UAV (unmanned aerial vehicle); si focalizza nello specifico l'attenzione sulle metodologie utilizzate per garantire l'elevata affidabilità morfologica dei dati ottenuti dal rilievo in un'area molto difficile da raggiungere e da misurare (Fig. 1).

La rocca è situata infatti sulla sommità del Monte Verruca, sui Monti Pisani con lo scopo di controllare la valle del fiume Arno, in prossimità del suo sbocco a mare. Fu edificata dai Pisani nel X secolo

ed è sempre stata considerata di grande importanza strategica per il mantenimento del potere militare sulla regione (Francovich & Gelichi, 2003). Firenze e Pisa nel XV secolo si contesero a lungo i possedimenti e i punti strategici sui Monti Pisani fino a quando la fortezza della Verruca fu conquistata definitivamente dai fiorentini nel 1503, anno in cui fu visitata dai grandi architetti militari della Repubblica, Sangallo e Leonardo, per volere di Machiavelli (Pedretti, 1972); dopo pochi anni vengono ammodernate le difese della struttura, in modo tale da potersi difendere dal tiro di armi da fuoco.

A causa della perdita di importanza strategica di questi punti di vedetta, la rocca venne lentamente



Fig. 1 - Vista aerea della rocca della Verruca (foto degli autori, 2019)

abbandonata nei decenni successivi. Oggi si trova in uno stato di rudere, e recentemente un incendio estivo ha causato la perdita della vegetazione che si era massificata intorno all'edificio, consentendo così di prevedere l'analisi delle murature della fortezza per approfondirne la storia costruttiva e lo stato di conservazione materiale e strutturale (Fig. 2).

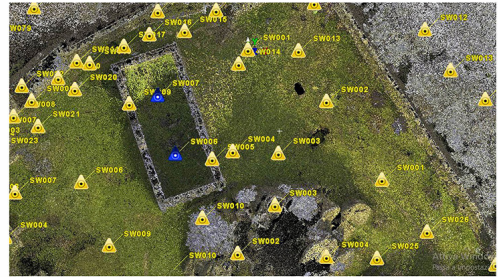
A maggio 2019 è iniziata una collaborazione tra il comune di Vicopisano, su cui sorge parte del perimetro fortificato, e il Dipartimento di Architettura (DiDA) dell'Università di Firenze per la realizzazione dei rilievi architettonici della fortificazione; il progetto di rilievo della fortezza ha previsto l'utilizzo sperimentale di strumentazioni di rilievo digitale laser scanner, drone e GPS di ultima generazione, per creare un modello digitale altamente affidabile; la fortezza era stata già parzialmente rilevata in passato, trovando grandi difficoltà nel misurare le parti esterne, lungo i ripidi pendii, dove è possibile vedere come l'edificio poggia direttamente sulle rocce che caratterizzano il Monte Serra e ne fanno derivare il nome; il più recente rilievo delle strutture era stato realizzato con il supporto di una stazione totale da un gruppo di studio dell'Università di Pisa (Nicolosi, 2000).

I modelli tridimensionali derivanti dal rilievo laser scanner e dalla fotogrammetria con

drone sono stati uniti in un unico modello texturizzato. Per garantire l'affidabilità dei modelli digitali ricostruiti con le diverse tecniche di acquisizione, particolare attenzione è stata posta al confronto tra le morfologie delle nuvole di punti ottenute e alla contestuale verifica dei punti di controllo misurati sia in coordinate locali che georeferenziate; per garantire l'affidabilità dei singoli modelli è stato necessario prestare attenzione anche alla fase di registrazione dei dati. I risultati del rilievo hanno consentito di ricostruire disegni bidimensionali e tridimensionali che hanno permesso di approfondire le analisi architettoniche e storiche della fortezza; suscita infatti molto interesse nello studio dell'evoluzione delle fortezze alla fine del 1400 e nell'attività di architetto militare sia di Sangallo che di Leonardo da Vinci.

2. Rilievo architettonico

La posizione della fortezza della Verruca non presenta condizioni ottimali per poter programmare le operazioni di misurazione: il rilievo delle aree interne alle mura non è così complesso come l'esterno, che è disposto su un ripido pendio con fitta vegetazione che non facilita il passaggio di operatori, strumenti e la corretta acquisizione di misure. Nonostante ciò, negli ultimi decenni sono stati effettuati alcuni



POSTAZIONI DEL LASER SCANNER RIPORTATE SUL MODELLO DI NUVOLA COMPLETO



VISTA NORD OVEST

Fig. 2- Elaborazioni della nuvola di punti tridimensionale ottenuta da laser scanner (elaborazioni della nuvola eseguite dagli autori, 2022)

rilievi strumentali, che non hanno consentito però la descrizione dettagliata delle murature, consentendo la restituzione in una scala non inferiore ad 1:100, e hanno presentato alcune approssimazioni per quanto riguarda le parti morfologicamente più complesse delle strutture: la necessità di un rilievo dettagliato necessario ad interpretare, seguendo un metodo scientifico, lo stato di conservazione e le fasi costruttive dell'edificio hanno portato alla progettazione di

una più moderna ed accurata campagna di rilievo.

I recenti incendi dolosi, che hanno colpito la vetta del Monte Verruca, hanno nel contempo in parte favorito la progettazione e la realizzazione di nuove campagne di rilievo, adottando in questo caso sistemi di acquisizione dati digitali. In particolare sono state realizzate tre diverse campagne di acquisizione, che sfruttano differenti strumentazioni e metodi di misurazione: strumenti



Fig. 3- Elaborazioni del modello tridimensionale mappato ottenuto da fotogrammetria (immagini da drone estratte dal sito Leicageosystem, elaborazione del modello degli autori, 2022)

laser scanner per creare un modello che descriva in dettaglio e con accuratezza la morfologia dell'edificio; acquisizioni fotografiche e ricostruzioni SfM (Structure from Motion) da terra per creare modelli tridimensionali che descrivano la matericità delle pareti; fotogrammetria aerea con l'utilizzo di droni, per creare un modello tridimensionale dell'intero complesso.

3. Metodologie

Il rilievo laser scanner della fortezza della Verruca è stato progettato per descrivere tutte le superfici dell'architettura con una definizione che consentisse la restituzione grafica dei disegni necessari alla predisposizione delle indagini diagnostiche (Bigongiari & Pancani, 2020). Le scansioni sono state effettuate con lo strumento Leica RTC360, le cui caratteristiche hanno consentito il rapido completamento di misurazioni altamente affidabili: lo scanner è infatti in

grado di misurare oltre due milioni di punti al secondo, realizzando fotografie panoramiche HD; le 5 telecamere posizionate ai bordi dello strumento consentono inoltre il riconoscimento della scena in cui si trova lo scanner e dei suoi movimenti, consentendo l'allineamento delle scansioni direttamente sul campo. Il risultato delle acquisizioni ha prodotto una nuvola di punti in coordinate locali risultante dall'allineamento di 145 scansioni (Fig. 3).

Il corretto allineamento è stato verificato in prima istanza costruendo cloud-constraints che realizzassero un percorso poligonale chiuso, che quindi consentisse il calcolo degli errori di allineamento; successivamente, una volta accettati per la scala di restituzione i valori di disallineamento ottenuti sono state verificate le registrazioni sezionando il modello in più punti con piani orizzontali e verticali e controllando il corretto allineamento delle stazioni. Nonostante la

CERTIFICAZIONE DELLA ROCCA DELLA VERRUCA - Esempio di compilazione

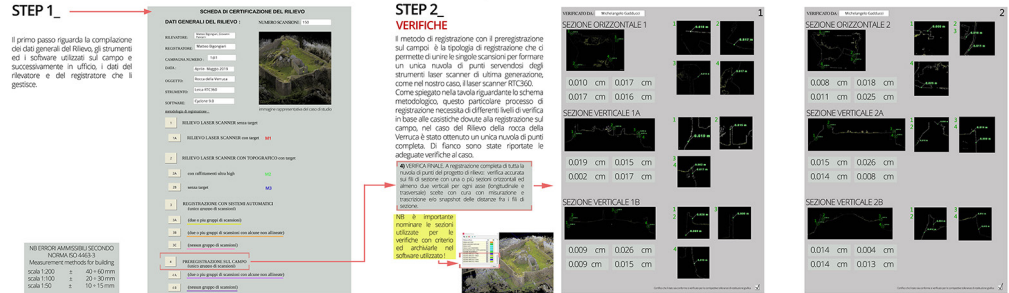


Fig. 4- Sistema di certificazione del dato laser scanner per analisi delle sezioni delle nuvole registrate (elaborazione grafica degli autori, 2022)

presenza di vegetazione, i risultati hanno garantito errori di allineamento inferiori ad 1,5 cm sulla distanza dei fili di sezione (Fig. 4). Il rilievo fotogrammetrico 3D è stato effettuato con lo scopo principale di produrre immagini rettificata delle superfici architettoniche da utilizzare per le indagini diagnostiche e per analizzare le stratigrafie delle murature; per ottenere questo risultato è stato utile combinare le acquisizioni da terra con le acquisizioni ottenute dai voli con droni per risolvere alcuni problemi di coni d'ombra, dovuti in particolare alla presenza di vegetazione.

Il rilievo fotografico della Verruca è stato particolarmente complesso a causa di una serie di condizioni ambientali che hanno reso difficoltoso lo scatto: le difficoltà maggiori si sono incontrate lungo il perimetro esterno della fortificazione, che, trovandosi sulla sommità di un monte particolarmente roccioso, non permetteva di spostarsi facilmente intorno ad esso per realizzare tutte le foto utili a costruire un modello tridimensionale; inoltre la vegetazione circostante, anche se non particolarmente rigogliosa dopo gli incendi, ha imposto continui movimenti e cambi di inquadratura e definizione delle superfici murarie, oltre che ha provocato notevoli differenze di illuminazione dovute al filtraggio della luce attraverso rami e tronchi. Oltre a ciò, in alcune zone non è stato possibile riprendere la tessitura muraria a causa del degrado causato dalla vegetazione spontanea. Le campagne fotografiche sono state quindi organizzate per risolvere queste difficoltà e per ottenere un modello strutturato che potesse descrivere le superfici con una definizione almeno in scala 1:50.

Nella scelta della corretta strumentazione da utilizzare per le riprese è stata considerata la condizione di scarsa illuminazione, che provoca

abbagliamento di punti luce dove entrano i raggi solari. Per questo si è reso necessario prevedere l'utilizzo di strumenti che fossero in grado di realizzare inquadrature di alta qualità nonostante la luce presente fosse significativamente sfavorevole allo scatto fotografico. È stata utilizzata una fotocamera full frame Sony A 7R II (sensore CMOS da 42,4 MP) mirrorless, in modo da garantire un alto livello di definizione, che fosse in grado di descrivere le pareti nei suoi dettagli: questa fotocamera è in grado di restituire fotogrammi di alta qualità anche impostando una sensibilità piuttosto elevata, in modo tale da favorire lo scatto senza treppiede; lo stesso corpo macchina è stato montato per le riprese con il drone, sul modello Leica Airbot AX20 (Fig. 5).

Per ricostruire al meglio le superfici della fortezza, si è deciso di riprendere inquadrature seguendo tre livelli di indagine: un primo da terra muovendosi intorno all'oggetto a distanza ravvicinata, un secondo aereo scattando immagini zenitali, un terzo ancora aereo ma inclinando la telecamera verso gli alzati per riprendere al meglio i prospetti.

Ognuna di queste sequenze fotografiche, riprendendo oggetti da diverse distanze, richiedeva l'uso di obiettivi con diverse lunghezze focali. Per la prima sequenza, da terra, è stato utilizzato un Sony FE 28mm f/2 28mm, ideale per muoversi intorno agli oggetti anche a distanze ravvicinate, inferiori ai 2 metri: con questo obiettivo sono state acquisite tutte le superfici esterne ed interne della fortificazione. Per la seconda e la terza sequenza è stato utilizzato un Sony Zeiss Sonnar T*FE 55mm f1.8 ZA 50mm, ruotando intorno alla fortezza a una distanza più o meno fissa. La scelta della focale si è basata sullo studio della risoluzione che deve essere garantita ai fotogrammi per rientrare nelle scale di riduzione del modello tridimensionale;



Fig. 5- Pianta della fortezza realizzata utilizzando come sfondo la nuvola di punti e restituendo le curve di livello del terreno circostante (elaborazione grafica degli autori, 2022)

se, nel caso del rilievo laser scanner, che viene acquisito direttamente in scala metrica, è possibile valutare la definizione in base alla griglia dei set point, per quanto riguarda il rilievo fotografico, la valutazione della definizione deve essere progettata su la base della densità di pixel con cui vengono definite le superfici. Le acquisizioni fotografiche hanno mantenuto un rapporto di almeno 6px/cm con un margine minimo di sovrapposizione tra fotogrammi contigui del 50%.

Sono stati inoltre posizionati 9 target a terra e sono state ottenute le corrispondenti coordinate GPS, utili per scalare e georeferenziare le nuvole di punti aerofotogrammetriche.

Al termine della fase di raccolta dati, 682 immagini finali sono state importate e orientate nel software 3DF Zephyr durante il processo di ricostruzione 3D. La nuvola di punti fotogrammetrica è stata poi unita alla nuvola di punti del laser scanner per ottenere un modello ancora più dettagliato, oltre che scalato e georeferenziato. L'unione dei modelli è avvenuta per punti di controllo (50 punti distribuiti a distanza costante in modo da

controllare tutto il modello) evidenziando errori di allineamento inferiori a 1,5 cm.

Prima di procedere con l'elaborazione dei dati per la ricostruzione della scena tridimensionale, è stato effettuato un attento controllo di qualità sui fotogrammi: anche se si è sempre cercato di mantenersi entro i tempi di scatto di sicurezza per evitare l'effetto mosso negli scatti fotografici (Forti, 2006), soprattutto per quanto riguarda le acquisizioni da distanza ravvicinata in cui, muovendosi intorno all'oggetto, si incorre in ripetuti cambiamenti di esposizione alla luce, si doveva evitare il rischio di avere fotogrammi fuori fuoco o con esposizione errata. Per questo motivo le foto in formato .raw sono state importate in un apposito software con lo scopo di verificarne la corretta messa a fuoco e regolarne i parametri. In questo modo il bilanciamento del bianco è stato equalizzato per tutti gli scatti in modo da avere un colore il più uniforme possibile.

A causa delle diverse esposizioni alla luce delle superfici, si è inoltre deciso di limitare al minimo la presenza di zone sovrailluminate e in ombra,



Fig. 6- Restituzione grafica a filo di ferro di uno degli alzati della fortezza (elaborazione grafica degli autori, 2022)

riducendo al minimo i parametri Luci e Ombre. Infine, abbiamo cercato di rendere l'esposizione delle superfici il più omogenea possibile variando il parametro in base al tempo di scatto del fotogramma.

I dati provenienti da diversi sistemi di acquisizione sono stati utilizzati per realizzare i disegni tecnici (piante e sezioni), attraverso una metodologia consolidata che prevede l'estrazione delle geometrie dal dato delle nuvole di punti del laser scanner, la matericità delle superfici dalle acquisizioni fotogrammetriche: entrambi i database hanno stato opportunamente sottoposto a protocolli di certificazione dei dati al fine di verificare l'affidabilità sia della registrazione delle scansioni che della calibrazione dei fotopiani

sulla nuvola di punti (Pancani, 2017) (Figg. 5-7). La verifica dell'affidabilità delle ricostruzioni è avvenuta attraverso il confronto tra i diversi sistemi di rilievo tridimensionale: il rilievo ha integrato diverse metodologie, producendo differenti copie digitali della Verruca con diversi livelli di affidabilità.

Possiamo sintetizzare le acquisizioni in tre diversi sistemi di ricostruzione: laser scanner, SfM e GPS. Due di questi metodi di acquisizione sono in grado di fornire una misura entro predeterminati parametri di errore: la singola scansione da laser scanner infatti, a seconda del modello di strumento, garantisce un'elevata affidabilità, nel nostro caso millimetrica; allo stesso modo il GPS ha misure centimetriche garantite sul piano xy; 1,2

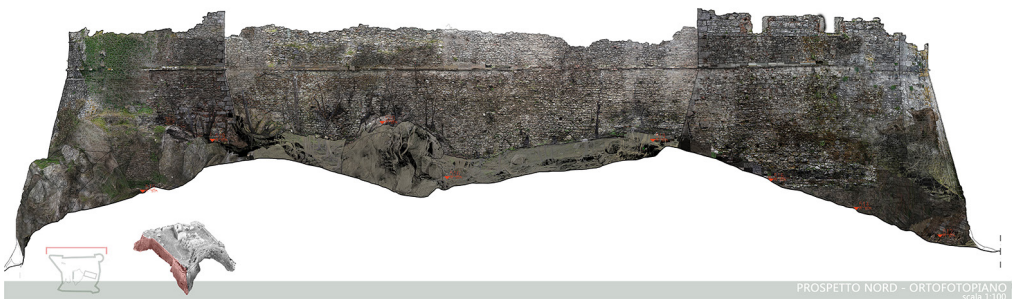


Fig. 7- Restituzione grafica a fotopiano di uno degli alzati della fortezza (elaborazione grafica degli autori, 2022)

cm sull'asse verticale. Purtroppo, non si può dire lo stesso delle ricostruzioni fotogrammetriche, sebbene il posizionamento del trigger point sia avvalorato dalla presenza sul drone di un GPS ad alta precisione: il posizionamento del trigger point, infatti, non garantisce la corretta ricostruzione delle nuvole di punti che vengono influenzate da numerose e diverse problematiche legate alla sorgente luminosa (Pancani & Bigongiari, 2019).

Per questo, dopo un accurato controllo del processo di registrazione si è preso come base morfologica il rilievo laser scanner, le cui coordinate polari sono state utilizzate per verificare i punti di controllo del rilievo fotogrammetrico, sia da terra che dal drone. Contestualmente, è stata sperimentata l'unione tra allineamento laser scanner e fotogrammetria, ottenendo interessanti risultati in termini di affidabilità del modello mesh.

Insieme agli sviluppatori di 3d FLOW con i quali è attiva una collaborazione dal 2019, c'è l'intenzione di migliorare questi algoritmi per rendere il rilievo fotogrammetrico ancora più un rilievo integrato.

Bibliografia

- Bigongiari, M. & Pancani, G., (2020) Digital survey for the structural analysis of the Verruca fortress. *Procedia Structural Integrity*, 29, 149-156.
- Colomina, I. & Molina, P. (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 92, 79–97.
- Forti, G. (2006) *Fotografia, teoria e pratica della reflex*. Roma, Editrice reflex.
- Francovich, R. & Gelichi, S. (2003) *Monasteri e castelli fra X e XII secolo. Il caso di San Michele alla Verruca e le altre ricerche storico-archeologiche nella Tuscia occidentale*. Firenze, Firenze all'insegna del Giglio.
- Gaiani, M. (2015) *I portici di Bologna, Architetture, modelli 3D e ricerche tecnologiche*. Bologna, Bononia University press.
- Murtiyoso, A. & Grussenmeyer, P. (2017) Documentation of Heritage Buildings using Close-Range UAV images: dense matching issues, comparison and case studies. *The photogrammetric Record*, 32 (159), 206-229.
- Pancani, G. (2017) Rilievo delle lastre tombali del Camposanto Monumentale di Piazza dei Miracoli a Pisa. In: Caccia Gherardini, S. & De Vita, M. (a cura di) *Restauro archeologico*. Firenze University Press, Firenze.
- Pancani, G. & Bigongiari, M. (2019) The Integrated Survey of the Pergamum by Nicola Pisano in the Cathedral of Pisa. In: Kremers, H. (a cura di) *Digital Cultural Heritage*. Springer, Cham.
- Pedretti, C. (1972) La Verruca. *Renaissance Quarterly*, 25 (4), 417-425.

4. Conclusioni

L'indagine Verruca ha permesso di sperimentare numerosi sistemi di acquisizione dati per integrare i risultati dei diversi strumenti. Il modello 3D ottenuto dal drone, necessario per la ricostruzione di texture affidabili, è stato verificato affidabile per cm rispetto al modello laser scanner. Sono stati ottenuti disegni altamente affidabili utili per analizzare lo stato di conservazione dell'architettura; grazie all'utilizzo del drone è stato possibile misurare punti fino ad ora non accessibili. La ricerca sulle metodologie da parte del gruppo, in collaborazione con la software house 3d FLOW, sarà sempre più indirizzata allo studio di sistemi rapidi che integrino laser scanner e acquisizioni con droni per ottenere dati sempre più affidabili. I cuni risultati delle analisi diagnostiche realizzate a partire dal rilievo 3D qua presentato possono essere approfonditi in (Pancani & Bigongiari, 2020), dove si fornisce un quadro più completo delle problematiche conservative e delle possibilità di sviluppo del progetto relativamente alla conservazione.