Rilevamento geomatico integrato a supporto della valorizzazione di un bene culturale: Forte Puin a Genova

Iacopo Gentile[1][0009-0008-4608-7777], Antonio Cuomo[2][0009-0007-3437-7788], Gaia Di Pasquale[1][0009-0006-1041-1999], Simone Giardino[1][0009-0002-9427-6579], Alessia Annarita Maiello[1][0009-0006-9633-5375], Gioia Panizzi[1][0009-0004-3663-1872], Lara Tedesco[1][0009-0005-1095-7564], Domenico Sguerso[2][0000-0001-7683-3306], Paola Salmona[2][0000-0001-7165-0762]

[1] Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Antichità Filosofia e Storia, s5704185@studenti.unige.it
[2] Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica e Ambientale, paola.salmona@unige.it

Abstract. A seguito del recente restauro del Forte Puin svolto nell'ambito di un progetto parte del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, l'associazione che lo gestisce ha ritenuto utile poter disporre di un suo rilievo completo. L'esigenza è divenuta un caso studio per gli studenti di archeologia e ingegneria dell'Università di Genova iscritti al Laboratorio di Rilevamento Archeologico (LaRA), che hanno colto l'occasione per effettuare anche una comparazione tra due software di ricostruzione fotogrammetrica.

Parole chiave: Rilievo integrato, Confronto tra nuvole di punti, Formazione, Patrimonio culturale, Pubblica fruizione.

1 Storia, struttura architettonica e finalità del rilievo

Il rilievo integrato oggetto di questo articolo ha avuto come fine la progettazione, realizzazione e analisi di un modello tridimensionale dell'ottocentesco Forte Puin mediante nuvola di punti georiferita, per lo studio, la valorizzazione e la conservazione dell'edificio. La struttura in questione è ubicata sulle alture di Genova a circa 500 m sul livello del mare e fa parte di un sistema difensivo più ampio comprendente numerose altre fortificazioni erette tra il XVIII e il XIX secolo a protezione della città. Il processo che portò alla sua edificazione prese avvio sotto il governo napoleonico, che ritenne utile la fortificazione di un'area già stata teatro di un aspro combattimento tra i francesi – che controllavano la città – e gli austriaci. All'epoca di questo scontro esistevano solo i resti di una ridotta settecentesca in muratura, parte di una più ampia fortificazione provvisoria esterna alle mura che, partendo dal Forte Sperone, percorreva il crinale in direzione nord fino a raggiungere le creste del Monte dei Due Fratelli, a settentrione del Puin (Fig. 1). Tra il 1801 e il 1805 il Corpo del Genio Militare napoleonico elaborò numerose proposte per il rafforzamento degli apprestamenti sopra menzionati e probabilmente diede inizio ai lavori, che vennero però ultimati, almeno per quanto concerne il Puin, tra il 1815 e il

1828 per mano del Genio sabaudo [3]. Sono anni che videro una generale opera di ammodernamento e potenziamento delle difese della piazzaforte genovese, considerata l'ultimo baluardo per i Savoia nel caso di una nuova invasione del Piemonte da parte di potenze straniere.



Fig. 1. Veduta del territorio a meridione del Forte: sulla sinistra si può osservare la Val Bisagno, mentre sulla destra, in lontananza, è visibile la cima su cui insiste il Forte Sperone e da cui parte il crinale che giunge fino al Puin per poi proseguire verso i Due Fratelli.

Le forme assunte entro il terzo decennio dell'Ottocento sono pressappoco quelle ancora oggi osservabili (Fig. 2): un recinto bastionato di pianta rettangolare rinforzato da cinque baluardi (due pentagonali agli estremi del lato sud e una triade stellare su quello nord), un terrapieno da esso racchiuso e, infine, una torre collocata al suo centro, il cui primo piano è protetto a nord dal terrapieno (di quota maggiore nella parte settentrionale).



Fig. 2. Veduta complessiva del Forte Puin.

La torre consiste in una massiccia costruzione a cubo in pietra calcarea coperta a terrazza, il cui perimetro è difeso dalle caditoie che sporgono dai lati di quest'ultima (quella del prospetto principale non esiste più) e da due ordini di feritoie; l'accesso avviene tramite una piccola porta posta al centro della facciata e raggiungibile per mezzo di un'ampia scala [4]. L'interno è a due piani coperti da una volta a botte e suddivisi ciascuno in due ambienti da una grossa muratura di spina; in un quadrante laterale della superficie interna sono stati ricavati una piccola scala, un cucinino al piano terreno e un gabinetto di servizio al primo piano, mentre al di sotto del piano terra si trovano i magazzini, formati da tre locali. Sul lato settentrionale dell'edificio è addossata una piccola casamatta, accessibile dall'esterno. I tratti caratterizzanti degli interventi sardi – al Puin come altrove – sono da individuarsi nell'uso sistematico del mattone per il rivestimento esterno e l'incorniciatura delle feritoie e nell'incremento del numero di queste ultime. [4]

Nel 1913, con il disarmo della maggior parte dei forti genovesi, iniziò per essi un periodo di abbandono interrotto solo da provvisori riutilizzi durante i due conflitti mondiali, che li videro assolvere alla funzione di carceri o postazioni dell'antiaerea. Nel 1958 il forte venne dato in concessione ad un privato che lo ristrutturò, utilizzandolo poi come abitazione per una ventina d'anni. Tra gli interventi effettuati vanno segnalati, per le modifiche apportate alla costruzione originaria, l'innalzamento di una tramezza volto a ricavare due locali nel vano nord del primo piano, la realizzazione dei servizi igienici e l'inserimento di merli ghibellini al centro del parapetto del prospetto principale. Infine, dopo decenni di indifferenza, negli anni '90 si assistette a un rinnovato interesse della Pubblica Amministrazione verso queste opere militari, interesse che portò alla risistemazione e apertura al pubblico di alcune di esse, tra le quali il Forte Puin. [3]

Nel 2023 il Forte è stato oggetto di un nuovo restauro [5] nell'ambito del progetto di Valorizzazione della Cinta Muraria e del Sistema dei Forti Genovesi promosso dall'allora Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo (MiBACT) – oggi Ministero della Cultura (MiC) - nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), avviato con lo scopo di promuovere la salvaguardia e la fruizione dell'area collinare posta alle spalle della città, caratterizzato dalla presenza delle mura seicentesche e di numerosi forti. Oggi il Forte Puin è in ottimo stato di conservazione. Ha inoltre assunto la funzione di punto di sosta e ristoro lungo i percorsi escursionistici della Strada dei Forti e ospita le attività dell'associazione Outdoor Experience Genova, che dal 2021 ne ha la concessione e ne garantisce la fruibilità. Ad essa si deve la necessità di un rilievo al fine di registrare l'attuale stato del Forte. Questa esigenza è stata trasformata in opportunità, facendone materia di studio per gli studenti di archeologia e ingegneria iscritti al Laboratorio di Rilevamento Archeologico (LaRA) dell'Ateneo genovese [8]. Con la supervisione dei docenti, gli studenti hanno progettato ed effettuato una campagna di rilievo tramite fotogrammetria da drone e da terra e laser scanner. Hanno quindi proceduto all'elaborazione come nuvole di punti dei dati rilevati e alla costruzione del modello tridimensionale del forte. Particolare attenzione è stata dedicata alla valutazione della qualità delle nuvole di punti, comparando i risultati ottenuti utilizzando due diversi software di elaborazione fotogrammetrica.

2 Progettazione ed esecuzione della campagna di rilievo

Il rilievo integrato è stato eseguito mediante l'utilizzo combinato di fotogrammetria – sia da drone (Mavic 2 Pro) che da terra con fotocamera (Canon EOS D40) – e laser scanner (SLAM Leica BLK 2 ARC) e GNSS (Stonex S850+). Sebbene il Forte non sia di grandi dimensioni, l'esecuzione del rilievo ha richiesto un'attenta progettazione, sia per la sua posizione orografica che a causa della fitta vegetazione. Nello specifico, la fotogrammetria è stata impiegata per modellare l'esterno del Forte e parte del territorio ad esso circostante. Il laser scanner è invece servito per acquisire la geometria degli ambienti esterni ed interni e per aggiungere alla nuvola di punti fotogrammetrica i dettagli dei parapetti e del terrapieno non totalmente visibili dalle riprese aeree, come ad esempio le feritoie. Tramite rilievo satellitare GNSS in tempo reale NRTK, in appoggio al Servizio di Posizionamento della Regione Liguria, inquadrato nel Sistema di Riferimento nazionale ETRF2000-2008.0, sono stati georiferiti quattordici target (Fig. 3) utilizzati quali punti di appoggio o Ground Control Point (GCP) per la georeferenziazione delle nuvole fotogrammetrica e laser scanner.

I target sono stati disposti in modo da vincolare il più possibile la geometria della struttura sul territorio: alcuni sono stati collocati lungo il sentiero che corre tutto intorno al recinto, gli altri sul terrapieno, sia in corrispondenza dei bastioni che intorno alla torre, e, per ultimo, è stato posto un target sul terrazzo di quest'ultima. In tal modo le nuvole di punti sono state inquadrate all'interno del medesimo sistema di riferimento, permettendo la comparazione finale dei risultati ottenuti attraverso le elaborazioni condotte mediante due differenti software.



Fig. 3. Alcuni dei target utilizzati.

3 Elaborazione dei dati

3.1 Laser scanner

Per l'acquisizione dell'interno del Forte e un rilievo più accurato della piazza d'armi, è stato impiegato il laser scanner SLAM [6] Leica BLK ARC. Per diverse

problematiche occorse nel rilievo, hanno portato alla realizzazione di sette nuvole di punti disgiunte che sono state pulite da informazioni non rilevanti, come la vegetazione, mediante il software Cloud Compare [2]. Successivamente sono state allineate utilizzando i target ed una serie di punti naturali in corrispondenza degli elementi architettonici maggiormente riconoscibili all'interno delle diverse acquisizioni. Infine, la nuvola così ottenuta è stata georiferita mediante rototraslazione basata sulle coordinate GNSS dei target rilevate in campo, ottenendo uno scarto quadratico medio inferiore a 3 cm (Fig. 4). È importante, tuttavia, evidenziare che per una svista il target posizionato sul terrazzo non risulta purtroppo identificabile nella nuvola di punti complessiva.



Fig. 4. Pulizia, assemblaggio e georeferenziazione della nuvola di punti laser scanner SLAM

3.2 Fotogrammetria

Il rilievo fotogrammetrico da drone è stato integrato con quello da terra per includere alcune parti scarsamente visibili dall'alto e per cogliere maggiori dettagli. Il dataset risultante è stato quindi importato ed elaborato separatamente in due diversi software, Agisoft Metashape [1], comunemente utilizzato in ambito geomatico, e RealityScan [7], prodotto da Epic Games e gratuito entro certe condizioni di carattere commerciale, con lo o scopo di comparare le procedure di elaborazione e i risultati ottenuti nei due modi. In entrambi i casi si è proceduto ad un primo allineamento delle immagini e alla calibrazione delle camere. Successivamente si è passati alla fase di collimazione dei Ground Control Point (GCP) georeferenziati. Tale fase si è rivelata più complessa del previsto, poiché una parte consistente delle immagini da drone è risultata sovraesposta. Per motivi logistici, infatti, i voli sono stati effettuati nelle ore centrali della giornata, in una situazione caratterizzata da forte luce solare, causando localmente la perdita di contrasto e conseguente dettaglio. Per garantire un numero adeguato di punti omologhi sono stati quindi collimati manualmente punti naturali, stabili e facilmente riconoscibili. I target che in questa fase hanno portato a maggiori problemi sono stati soprattutto quello sul tetto e quelli lungo i sentieri prossimi alle mura del recinto. Completata la collimazione è stato eseguito un nuovo allineamento del blocco fotogrammetrico in entrambi i software, con conseguente stima dei parametri di orientamento delle camere e produzione della cosiddetta nuvola di punti sparsa.

Successivamente, i processi di elaborazione fotogrammetrica delle cosiddette nuvole dense, sono stati condotti in parallelo in Metashape e RealityScan, seguendo le differenti procedure in relazione alle specifiche modalità di gestione ed integrazione dei dati adottate dai due software.
La nuvola densa ottenuta con Metashape (Fig. 5) e quella ottenuta con RealityScan (Fig. 6) sono entrambe qualitativamente valide, ma per un confronto quantitativo occorre tenere conto del fatto che quest'ultimo introduce l'informazione geometrica proveniente dal rilievo laser nella stessa realizzazione della nuvola sparsa. RealityScan, infatti, importa i dataset SLAM, consentendo di individuare manualmente le corrispondenze tra il dataset fotogrammetrico e quello laser scanner. Sulla base di tali vincoli è stato quindi effettuato l'allineamento delle immagini, ottenendo una nuvola sparsa allineata con il rilievo SLAM.



Fig. 5. Nuvola di punti densa georiferita ottenuta in Metashape.



Fig. 6. Nuvola di punti densa georiferita ottenuta in RealityScan.

4 Confronto

Nell'ultima fase del progetto sono state confrontate quantitativamente le nuvole dense fotogrammetriche generate utilizzando Metashape e RealityScan relativamente ad un'area campione corrispondente alla facciata principale della torre. Preliminarmente le due nuvole sono state filtrate e rese omogenee dal punto di vista della densità di punti mediante un sotto campionamento spaziale con passo pari ad 1 cm, al fine di ridurre possibili influenze sul confronto delle differenti distribuzioni dei punti. A partire dai Data set così ottenuti sono stati quindi generati due DSM (Digital Surface Model) delle superfici con risoluzione 1 cm, utilizzando come direzione di proiezione la normale alla superficie stessa e assumendo per ciascuna cella il valore mediano. I DSM sono stati successivamente confrontati mediante l'algoritmo di CloudCompare M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison), assumendo il DSM derivato da RealityScan come riferimento. Il confronto ha restituito i valori delle distanze tra le due superfici rappresentandole in un istogramma (Fig. 7); la distribuzione evidenzia una maggiore concentrazione prossima allo zero con una marcata dispersione dei valori. La distanza media risulta pari a circa +2,8 cm, la mediana a circa +2 cm con deviazione standard pari a circa 11 cm; circa il 42% dei valori ricade entro ±5 cm, il 63% entro ±10 cm, mentre il 90% entro ±20 cm. Tali risultati non sono certamente soddisfacenti e per comprenderne le cause occorre valutarne la distribuzione spaziale; la mappa M3C2 evidenzia infatti un gradiente pressoché continuo, con valori prevalentemente negativi nella parte inferiore a sinistra della facciata e progressivamente positivi procedendo in diagonale verso destra. Tale comportamento indica un sistematismo riconducibile ad una leggera rotazione tra le nuvole ottenute con Metashape e con RealityScan.

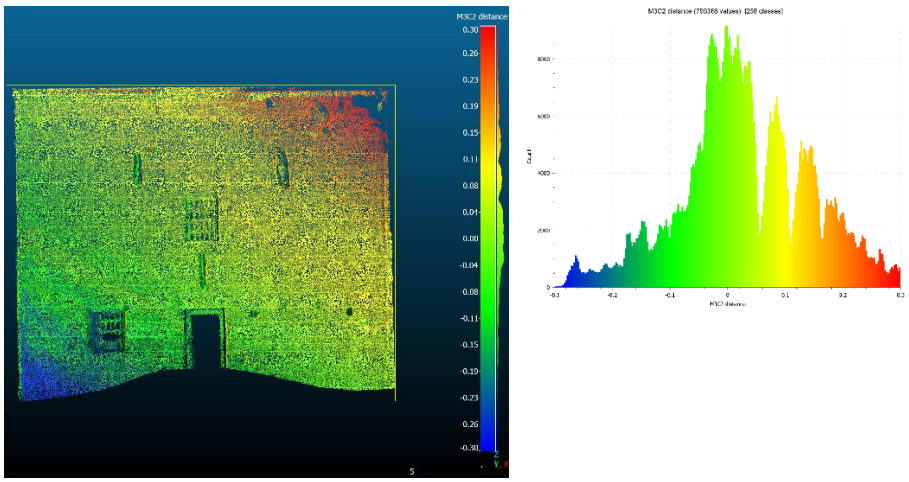

Fig. 7. Distribuzione e spaziale e relativo istogramma delle distanze tra le nuvole di punti fotogrammetriche dense della facciata principale della torre, generate in Metashape e RealityScan, confrontate con l'algoritmo M3C2 in CloudCompare.

Il risultato appare compatibile con il differente processo adottato nei due software: in Metashape infatti il risultato è maggiormente dipendente dalla collimazione dei GCP e dei punti naturali. In particolare, siccome il punto rilevato sulla copertura e all'esterno del recinto erano difficilmente identificabili nelle immagini a causa della forte sovraesposizione, l'incertezza della loro collimazione potrebbe avere influenzato il posizionamento globale del blocco fotogrammetrico, introducendo una componente rotazionale residua che è stata evidenziata dal processo.

In RealityScan, l'integrazione della nuvola da SLAM ha contribuito a ridurre l'influenza dei possibili errori di collimazione dei GCP, fornendo un riferimento geometrico aggiuntivo e rendendo più robusto l'orientamento complessivo del modello. Tuttavia, l'impossibilità di collimare sulla nuvola laser il target presente sul terrazzo in quota, potrebbe avere reso labile la rotazione della stessa nuvola densa.

In conclusione, si rinnova l'importanza di un buon rilievo integrato fotogrammetrico e laser scanner, sia come progettazione geometrica, sia in termini di qualità delle immagini e di una buona distribuzione dei Ground Control Point. Infatti se la geometria del laser scanner può essere considerata un valido appoggio, dall'altro il suo inquadramento nel sistema di riferimento comune è di particolare importanza.

Riferimenti bibliografici

1. Agisoft Metashape https://www.agisoftmetashape.com
2. Cloud Compare 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project https://www.cloudcompare.org
3. Finauri, S.: Forti di Genova – Storia, tecnica e architettura dei fortini difensivi. Edizioni Servizi Editoriali, Genova (2007) ISBN 8889384271, 9788889384275
4. Forti, L. C.: Le fortificazioni di Genova. 3a ed. Stringa Editore, Genova (1971).
5. Ministero della Cultura - Programmazione e Attuazione Strategica Nazionale e Comunitaria, sottoprogetto Forte Puin https://programmazionestrategica.cultura.gov.it/forte-puin/
6. Paris, L., Rossi, M.L., Quantità e qualità nell'utilizzo della tecnologia SLAM per il rilievo dell'architettura. in: Misura/Dismisura 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Congresso della Unione Italiana per il Disegno. pp. 1857-1876, Franco Angeli (2024) ISBN 9788835166948
7. RealityScan https://www.realityscan.com
8. Università di Genova, Laboratori del Corso di Laurea Magistrale Archeologie: Professione e Saperi (ArcheoPES), A.A: 2026-2027 https://corsi.unige.it/corsi/11936/studenti-laboratori