Confronto e analisi di sistemi SLAM per il rilievo 3D del patrimonio costruito: il caso della Certosa di Bologna

Anna Forte, Valentina Alena Girelli, Emanuele Mandanici, Maria Alessandra Tini
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Università di Bologna

Abstract. Il contributo confronta due sistemi LiDAR dinamici SLAM, Stonex X120GO e Z+F FlexScan 22, con un rilievo TLS Leica RTC360 della Sala della Pietà alla Certosa di Bologna. Distanze C2C, roughness e densità su superfici omologhe sono analizzate insieme ai tempi di acquisizione e ad altri aspetti operativi. Z+F mostra maggiore accordo con il TLS rispetto a X120GO, mentre il dato statico conserva il campionamento più denso nelle aree esaminate.

Parole chiave: LiDAR, SLAM, TLS, patrimonio culturale, Certosa.

1 Introduzione

La documentazione tridimensionale degli edifici storici richiede la selezione di tecniche di acquisizione coerenti con la complessità geometrica degli spazi, la scala di rappresentazione e le finalità conoscitive e conservative del rilievo [1]. La qualità della documentazione dipende, infatti, dalla capacità dei dati acquisiti di rappresentare le superfici, preservandone sia la continuità geometrica sia i dettagli ritenuti significativi. Il Terrestrial Laser Scanning (TLS) opera mediante acquisizioni effettuate da stazioni fisse e richiede la successiva registrazione delle singole scansioni in un unico sistema di riferimento. I sistemi LiDAR dinamici basati su Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) stimano invece, contestualmente all'acquisizione della nuvola di punti, la posizione e l'orientamento del sensore e ricostruiscono la geometria dell'ambiente durante il movimento dell'operatore. La rapidità di acquisizione e la flessibilità operativa ne favoriscono l'impiego in ambienti estesi, complessi o di difficile accesso [2]. La qualità della ricostruzione può tuttavia risentire della configurazione geometrica dello spazio, delle caratteristiche della traiettoria e della robustezza della soluzione di localizzazione [3]. La valutazione dei dati acquisiti mediante sistemi SLAM non può pertanto limitarsi alla sola concordanza geometrica tra le nuvole di punti, ma deve considerarne anche il contenuto informativo, attraverso parametri come la densità dei punti e la rumorosità locale delle superfici [4]. Tali indicatori consentono di valutare la qualità con cui vengono documentate le caratteristiche locali delle superfici. Il presente lavoro applica questo approccio comparato alla Sala della Pietà, presso il cimitero monumentale della Certosa di Bologna, confrontando le nuvole di punti acquisite con due sistemi LiDAR dinamici SLAM con un rilievo TLS assunto come riferimento.

2 Materiali e metodi

Il caso di studio è costituito dalla Sala della Pietà, situata all'interno del cimitero monumentale della Certosa di Bologna (Fig. 1) [5]. La complessa articolazione architettonica dell'ambiente, caratterizzato da uno spazio ipogeo collegato al livello superiore mediante una scalinata, offre un contesto significativo per esaminare la continuità della ricostruzione tridimensionale, la copertura delle acquisizioni e la capacità di rappresentare i dettagli. La compresenza di ambienti posti alla quota del suolo e di spazi ipogei costituisce una configurazione ricorrente nei complessi cimiteriali, soprattutto in quelli di carattere monumentale, e può introdurre specifiche criticità nelle attività di rilievo. I collegamenti verticali, le variazioni di quota, gli spazi confinati e la complessità dei percorsi possono infatti influire sia sulla pianificazione delle acquisizioni sia sulla continuità delle traiettorie rilevate mediante sistemi dinamici. I cimiteri monumentali sono inoltre spesso contraddistinti da una notevole estensione spaziale e dalla compresenza di elementi architettonici, decorativi, scultorei e pittorici. Tale eterogeneità rende questa tipologia di patrimonio culturale particolarmente significativa, ma al tempo stesso complessa dal punto di vista della documentazione tridimensionale, poiché richiede tecniche capaci di combinare rapidità operativa, continuità del rilievo e adeguata rappresentazione delle geometrie e dei dettagli. L'analisi è stata circoscritta alla porzione della sala comune alle tre acquisizioni, in modo da condurre i confronti su superfici di estensione comparabile.



Fig. 1. La Sala della Pietà nel complesso monumentale della Certosa di Bologna. Crediti dell'immagine: Comune di Bologna [5].

Le acquisizioni dinamiche sono state eseguite con Stonex X120GO, caratterizzato da un'accuratezza relativa nominale fino a 6 mm, una portata di 0,5–120 m e una frequenza di acquisizione di 320.000 punti/s [6], e con Z+F FlexScan 22, equipaggiato con sensore Z+F IMAGER 5024 SUPREME, per il quale sono dichiarati un errore di linearità nella misura della distanza ≤ 1 mm + 10 ppm, una portata di 0,3–365 m e una frequenza massima di circa 2,2 milioni di punti/s [7]. Il rilievo statico di riferimento è stato realizzato con Leica RTC360, con accuratezza nominale del punto 3D di 1,9 mm a 10 m, portata di 0,5–130 m e frequenza fino a 2 milioni di punti/s [8]. Il TLS ha richiesto circa 3 ore per 25 stazioni, mentre ciascun rilievo dinamico è durato circa 30 min. Per i sistemi SLAM sono stati eseguiti percorsi ad anello, finalizzati alla chiusura delle traiettorie (*loop closure*), e passaggi ripetuti nelle stesse aree, per aumentare la ridondanza delle osservazioni. Le stazioni TLS sono state distribuite assicurando sovrapposizioni adeguate, con particolare attenzione alla scalinata di collegamento con lo spazio ipogeo.

I dati sono stati elaborati con i software proprietari associati ai rispettivi strumenti. Le scansioni TLS sono state registrate in Cyclone REGISTER 360, ottenendo un residuo cloud-to-cloud medio di 0,002 m e una nuvola complessiva di 638.625.620 punti. I dati Stonex sono stati elaborati in GOpost mediante calcolo e ottimizzazione della traiettoria, generazione della nuvola e texturizzazione; il dataset risultante comprende 50.882.359 punti. La nuvola Z+F, elaborata in Z+F LaserControl, contiene 84.926.302 punti. Questi conteggi dipendono anche dalla frequenza di acquisizione, dalla durata e dalla geometria del percorso e dalle elaborazioni applicate. Il confronto è stato pertanto integrato con indicatori calcolati su aree omologhe estratte dalle nuvole complessive.



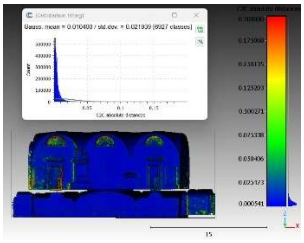
Fig. 2. Nuvole di punti acquisite con Leica RTC360 (a), Stonex X120GO (b) e Z+F FlexScan 22 (c).

2.1 Confronto tra i dati

Per rendere confrontabili i tre dataset, le nuvole di punti sono state registrate in un sistema di riferimento comune mediante allineamento rigido basato sull'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*). È stata quindi individuata la medesima regione di interesse, rimuovendo manualmente le porzioni non comuni dovute alle differenti geometrie di acquisizione e alle occlusioni. Le analisi sono state eseguite in CloudCompare, assumendo la nuvola TLS come riferimento di maggiore affidabilità metrica e considerando il suo residuo di registrazione nell'interpretazione degli scarti.

- **Distanze cloud-to-cloud (C2C).** Per ciascun punto della nuvola confrontata è stata calcolata la distanza euclidea dal punto più vicino della nuvola di riferimento. Sono stati eseguiti i confronti X120GO–Z+F, X120GO–TLS e Z+F–TLS, riportando media, deviazione standard e mappe degli scarti nella Tabella 1. Nel primo confronto il riferimento è la nuvola Z+F; negli altri due è la nuvola TLS.
- **Roughness.** La roughness è stata calcolata come distanza assoluta dal piano locale stimato entro un intorno sferico [9], utilizzando raggi di 0,05 m. I valori medi ottenuti sono pari rispettivamente a 0,002 m, 0,0006 m e 0,0006 m.
- **Densità.** La densità areale è stata determinata come rapporto tra il numero di punti e l'area sul piano locale di ciascuna porzione. Il confronto è stato condotto su porzioni omologhe quasi planari di pavimento, parete e volta, di circa 4,5 m² ciascuna, selezionate nelle tre nuvole in modo da riferirsi alle medesime superfici fisiche, con limiti di ritaglio ed estensione quanto più possibile coincidenti. È stata inoltre calcolata l'interdistanza media tridimensionale dal vicino più prossimo all'interno di ciascun ritaglio, escludendo il punto stesso. I risultati sono riassunti nella Tabella 2.

Tabella 1. Distanze C2C e mappe degli scarti

Confronto	Mappe C2C	Media [m]	Dev. std. [m]
X120GO–Z+F		0,010	0,022

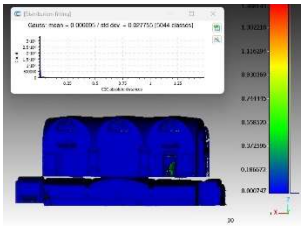
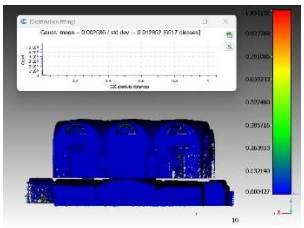
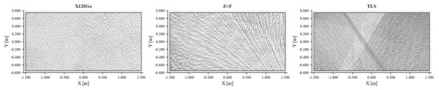
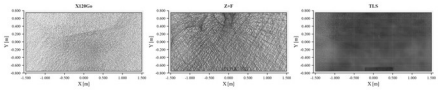
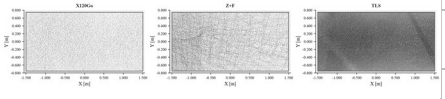
Confronto	Mappe C2C	Media [m]	Dev. std. [m]
X120GO–TLS		0,006	0,028
Z+F–TLS		0,003	0,013

Tabella 2. Densità e interdistanza media nelle tre porzioni omologhe, di circa 4,5 m² ciascuna.

Superficie e ritagli omologhi	Densità [punti/cm²]	Interdistanza media [m]
Pavimento	X120GO 5,320	X120GO 0,003
	Z+F 8,134	Z+F 0,002
	TLS 13,195	TLS 0,002
Parete	X120GO 13,170	X120GO 0,002
	Z+F 27,809	Z+F 0,001
	TLS 94,510	TLS 0,001
Volta / soffitto	X120GO 3,171	X120GO 0,003
	Z+F 7,184	Z+F 0,002
	TLS 40,628	TLS 0,002

3 Discussione

Il confronto mostra un maggiore accordo geometrico di Z+F con il riferimento TLS: dopo la registrazione ICP, la distanza media è di circa 3 mm, contro 6 mm per X120GO, con deviazioni standard rispettivamente di circa 13 e 28 mm. Questi valori esprimono

l'accordo residuo fra superfici campionate e registrate, senza misurare l'accuratezza assoluta dei sistemi. Z+F presenta una densità circa 1,5 volte quella di X120GO sul pavimento e oltre doppia su parete e volta. Sulla volta raggiunge il 18% della densità TLS, contro l'8% di X120GO: il divario può motivare verifiche della leggibilità dei dettagli superiori ed eventuali integrazioni statiche.

Sul piano operativo, entrambi i sistemi dinamici hanno ridotto a un sesto il tempo di acquisizione rispetto al TLS. Nel caso esaminato, la portabilità operativa, intesa come facilità di spostamento e continuità dell'acquisizione, risulta limitata per il TLS su treppiede, buona per Z+F e ottima per X120GO palmare. Il trasferimento e il posizionamento delle stazioni statiche richiedono maggiore impegno, soprattutto lungo la scalinata; FlexScan 22 permette l'acquisizione continua, mentre il palmare facilita i passaggi negli spazi confinati. Tale vantaggio richiede comunque traiettorie controllate, chiusure e verifiche geometriche. Per le configurazioni considerate, il confronto qualitativo dei costi d'acquisto colloca X120GO nella fascia più contenuta, Z+F in quella intermedia e il TLS in quella più elevata. Questa valutazione della dotazione va distinta dal costo complessivo del rilievo, che comprende anche licenze, risorse di calcolo e lavoro di elaborazione e controllo. I dati SLAM richiedono ricostruzione e verifica delle traiettorie, filtraggio e texturizzazione; il TLS comporta la registrazione delle stazioni e la gestione di una nuvola più numerosa.

4 Conclusioni

L'esperienza nella Sala della Pietà evidenzia compromessi differenti fra qualità geometrica del dato, campionamento, portabilità e investimento strumentale. Entrambi i sistemi dinamici riducono i tempi di acquisizione; fra essi, Z+F restituisce il maggiore accordo residuo con il TLS e il campionamento più denso nelle aree esaminate, mentre X120GO offre maggiore maneggevolezza e un costo d'acquisto più contenuto. Il TLS conserva il ruolo di riferimento metrico e la maggiore densità locale. La valutazione resta riferita al caso studio, alle superfici campione e alle condizioni di acquisizione ed elaborazione adottate.

Per la documentazione del patrimonio costruito, una strategia integrata può associare al rilievo dinamico dell'insieme scansioni statiche di controllo e approfondimento, selezionate in funzione delle tolleranze geometriche e del dettaglio richiesti. Gli sviluppi futuri dovranno comprendere acquisizioni ripetute, più aree campione, e verifica con riferimento esterno e indipendente della accuratezza metrica dei tre sistemi. Un confronto esteso all'intero processo consentirà di definire con maggiore precisione quando rapidità e portabilità compensino le differenze nel campionamento e in quali contesti possa essere necessaria un'integrazione con sistemi statici.

Riferimenti bibliografici

1. Remondino, F.: Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing 3(6), 1104–1138 (2011). https://doi.org/10.3390/rs3061104.

2. Bitelli, G.; Forte, A.; Mandanici, E.: SLAM Mobile Mapping for Complex Archaeological Environments: Integrated Above–Below-Ground Surveying. Geomatics 6, 31 (2026). https://doi.org/10.3390/geomatics6020031
3. Sammartano, G., Spanò, A.: Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. Applied Geomatics 10, 317–339 (2018). https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7.
4. Conti, A., Pagliaricci, G., Bonora, V., Tucci, G.: A comparison between terrestrial laser scanning and hand-held mobile mapping for the documentation of built heritage. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-2/W4-2024, 141–147 (2024). https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-141-2024.
5. Storia e Memoria di Bologna: La Certosa. https://www.storiaememoriadibologna.it/la-certosa (ultima consultazione: ottobre 2026).
6. Stonex: X120GO. Specifiche tecniche dei sistemi SLAM. https://getintouch.stonex.it/wp-content/uploads/2025/03/Stonex_SLAM_Specifiche-tecniche.pdf (ultima consultazione: ottobre 2026).
7. Zoller + Fröhlich: Z+F FlexScan 22 e IMAGER 5024 SUPREME. Schede del produttore. https://www.zofre.de/en/laser-scanners/3d-laser-scanner/z-f-flexscan-22; https://www.zofre.de/en/laser-scanners/3d-laser-scanner/z-f-imagerr-5024s-1 (ultima consultazione: ottobre 2026).
8. Leica Geosystems: Leica RTC360 3D Laser Scanner. Scheda del produttore. https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360 (ultima consultazione: ottobre 2026).
9. CloudCompare: Roughness. Documentazione ufficiale. https://cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Roughness (ultima consultazione: ottobre 2026).