

Dai Rilievi Dinamici al Controllo Cartografico: il Contributo della Tecnologia SLAM al Collaudo dei Database Geo-Topografici

di Eleonora Maset

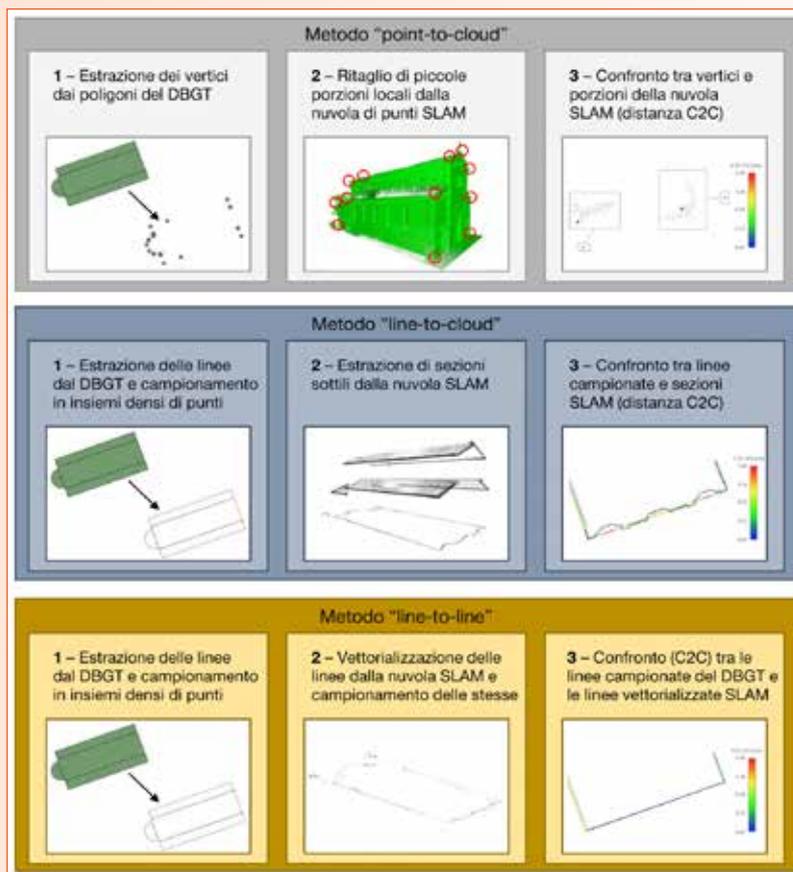


Figura 1: Schema delle tre metodologie proposte, che utilizzano le nuvole di punti ottenute dai rilievi SLAM come riferimento per valutare la precisione metrica di un database geo-topografico. Il confronto finale tra i dati di riferimento e le geometrie del database viene sempre espresso come distanza punto-punto (cloud-to-cloud, C2C).

1. L'esigenza di dati geospaziali affidabili

La richiesta di dati geospaziali aggiornati, accurati e affidabili è in costante crescita. La modellazione tridimensionale delle città, la costruzione di digital twin urbani e, più in generale, i processi decisionali legati alla gestione del territorio e alla pianificazione urbanistica, necessitano di basi

informative solide, coerenti e, soprattutto, verificate. In questo scenario, i Database Geo-Topografici (DBGT) rappresentano oggi la principale infrastruttura cartografica digitale a supporto degli strumenti di pianificazione predisposti sia dagli enti locali sia dalle amministrazioni regionali. Proprio per il ruolo che rivestono, tali database devono

Un'ipotesi operativa per rendere più efficiente la verifica della cartografia ufficiale.

essere sottoposti a controlli rigorosi prima di essere messi a disposizione degli utenti finali. La verifica metrica dei DBGT è tradizionalmente effettuata attraverso rilievi topografici puntuali. L'approccio consolidato prevede la selezione di alcuni elementi significativi – come spigoli di edifici, colmi di coperture o dettagli architettonici ben riconoscibili – e la loro misura sul campo tramite stazioni totali o ricevitori GNSS. Le coordinate ottenute vengono poi confrontate con quelle presenti nella banca dati. Si tratta di una procedura affidabile e ampiamente affermata, capace di garantire elevata accuratezza, ma non priva di limiti. Innanzitutto, le operazioni di rilievo possono richiedere tempi considerevoli, soprattutto in contesti urbani complessi, in corti interne poco accessibili o in presenza di vegetazione fitta. Inoltre, il numero di punti effettivamente misurabili è inevitabilmente ridotto rispetto alla ricchezza geometrica di un moderno database geo-topografico. Ne consegue un controllo che, agendo quasi esclusivamente sui vertici dei poligoni, tende

a trascurare la qualità metrica delle linee e delle superfici nella loro interezza.

Negli ultimi anni, però, l'evoluzione tecnologica ha messo a disposizione strumenti che offrono nuove interessanti possibilità anche in questo ambito. I sistemi laser scanner portatili basati su tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) – capaci di acquisire nuvole di punti mentre l'operatore cammina all'interno dell'area da rilevare, senza dipendere da punti di appoggio fissi né dalla continuità di ricezione del segnale GNSS – hanno raggiunto prestazioni tali da garantire accuratezze compatibili con rappresentazioni alle scale 1:100–1:200. Di conseguenza, questi strumenti di rilievo possono ormai essere considerati adeguati a fornire dati di riferimento per verifiche su scale cartografiche 1:1000 o 1:2000.

Lo studio presentato in questo articolo si inserisce proprio in questa prospettiva. L'obiettivo è esplorare l'impiego delle nuvole SLAM come riferimento per il collaudo geometrico di un database geo-topografico tridimensionale, valutando tre diverse metodologie di confronto – “point-to-cloud”, “line-to-cloud” e “line-to-line” – e analizzandone prestazioni, limiti e potenzialità nel contesto operativo reale.

2. Come confrontare cartografia e nuvola di punti SLAM: tre metodologie di analisi

Per comprendere e valutare come sfruttare al meglio l'informazione contenuta nella nuvola SLAM, sono state sviluppate e testate tre diverse metodologie di confronto, sintetizzate in Figura 1. Si tratta di tre approcci progressivi, che

vanno da una verifica puntuale a un'analisi sempre più completa delle geometrie, con livelli crescenti di rappresentatività e robustezza.

La prima metodologia proposta, chiamata “point-to-cloud”, è quella che più si avvicina ai controlli topografici tradizionali. Si parte dai vertici dei poligoni presenti nel database geo-topografico e, per ciascuno di essi, si isola una piccola porzione della nuvola SLAM nella zona corrispondente. Il confronto avviene poi tramite una misura di distanza tridimensionale tra il punto del DBGT e la porzione di nuvola estratta. L'approccio è semplice e intuitivo, particolarmente adatto a oggetti dalla geometria regolare o con vertici ben identificabili. Tuttavia, eredita gli stessi limiti delle verifiche topografiche classiche, poiché la valutazione metrica resta confinata a un insieme ristretto di punti.

Per superare questo limite, la seconda metodologia introduce un confronto più esteso, denominato “line-to-cloud”. In questo caso l'attenzione si sposta dai singoli vertici alle intere linee che delimitano gli oggetti. Per facilitare operativamente il confronto, le linee del DBGT vengono campionate in insiemi molto densi di punti, trasformando la geometria vettoriale in un set quasi-continuo di coordinate confrontabili. Parallelamente, dalla nuvola SLAM vengono estratte sezioni sottili in corrispondenza dell'oggetto analizzato. Il confronto non è più punto-punto, ma avviene tra due distribuzioni di punti che rappresentano, rispettivamente, l'oggetto cartografato e la sua acquisizione tridimensionale. Il vantaggio è immediato: la verifica diventa più rappre-

sentativa della geometria reale e gli errori locali incidono in misura minore, evitando che pochi scarti anomali inficino la valutazione complessiva della qualità del DBGT.

La terza metodologia, denominata “line-to-line”, compie un ulteriore passo avanti, introducendo un confronto omogeneo tra geometrie vettoriali. In questo caso la nuvola SLAM non viene sezionata, ma trasformata in linee ricostruite direttamente dall'operatore sulla base dell'informazione 3D. La vettorializzazione segue la forma reale degli oggetti, ma con una generalizzazione compatibile con la scala cartografica del database geo-topografico. Si ottengono così due rappresentazioni vettoriali – quella del DBGT e quella derivata dal rilievo SLAM – che possono essere campionate e confrontate come insiemi di punti equivalenti. È un approccio più impegnativo dal punto di vista operativo, perché richiede esperienza nella lettura e nella generalizzazione delle geometrie. Tuttavia, è anche il più robusto: permette di filtrare dettagli architettonici troppo minuti, come cornici, piccole sporgenze o gradini, che non sono significativi alla scala cartografica e che, se non opportunamente gestiti, potrebbero influenzare il confronto, introducendo scarti apparenti.

3. Aree di studio, dati utilizzati e risultati delle analisi

Le tre metodologie descritte in precedenza sono state applicate a due aree campione situate nel comune di Udine, selezionate per rappresentare contesti urbani con caratteristiche differenti (Figura 2). La prima area è Piazza Rizzi, nel settore nord della città: una zona

periferica con edifici bassi, un campanile che costituisce l'elemento architettonico più rilevante e una presenza limitata di vegetazione. La seconda, Piazzale Cella, si trova nella parte sud e, pur non ospitando edifici di particolare pregio, rappresenta un importante punto di transito urbano. Qui il tessuto edilizio è più moderno e verticale, mentre la vegetazione lungo le strade è fitta, tanto da ridurre significativamente la visibilità da un margine all'altro dell'area. Le due zone costituiscono quindi scenari complementari, utili per testare il comportamento delle metodologie in condizioni operative diverse. Per la parte cartografica, lo studio si basa sulla nuova produzione della regione Friuli Venezia Giulia, aggiornata negli ultimi anni attraverso la

realizzazione di un database geo-topografico conforme agli standard nazionali e internazionali. Per il territorio comunale di Udine il DBGT è disponibile alla scala 1:2000, in formato shapefile, e può essere scaricato liberamente dal geoportale regionale *Eagle.fvg* (<https://eaglefvg.regione.fvg.it/eagle/main.aspx?configuration=guest>). Dal database sono stati selezionati complessivamente 19 edifici, concentrandosi su due classi particolarmente significative nella costruzione di un DBGT: le "unità volumetriche", ovvero i poligoni che rappresentano in pianta i volumi elementari dell'edificio, e gli "elementi di copertura", che descrivono le geometrie tridimensionali dei tetti. Le nuvole di punti SLAM utilizzate come riferimento me-

trico per il collaudo sono state acquisite con il laser scanner portatile Stonex X120GO. Lo strumento, caratterizzato da una doppia rotazione del sensore, consente una scansione a 360° in orizzontale e quasi completa in verticale, registrando fino a 320.000 punti al secondo con una portata massima di 120 metri. La precisione dichiarata è dell'ordine di pochi millimetri e l'accuratezza di alcuni centimetri, valori che ne rendono l'impiego adeguato anche per attività di verifica della cartografia tecnica. Inoltre, il dispositivo può essere integrato con un modulo GNSS-RTK, grazie al quale la nuvola di punti generata tramite l'algoritmo SLAM viene georeferenziata direttamente, anche quando il segnale di posizionamento satellitare è disponibile solo

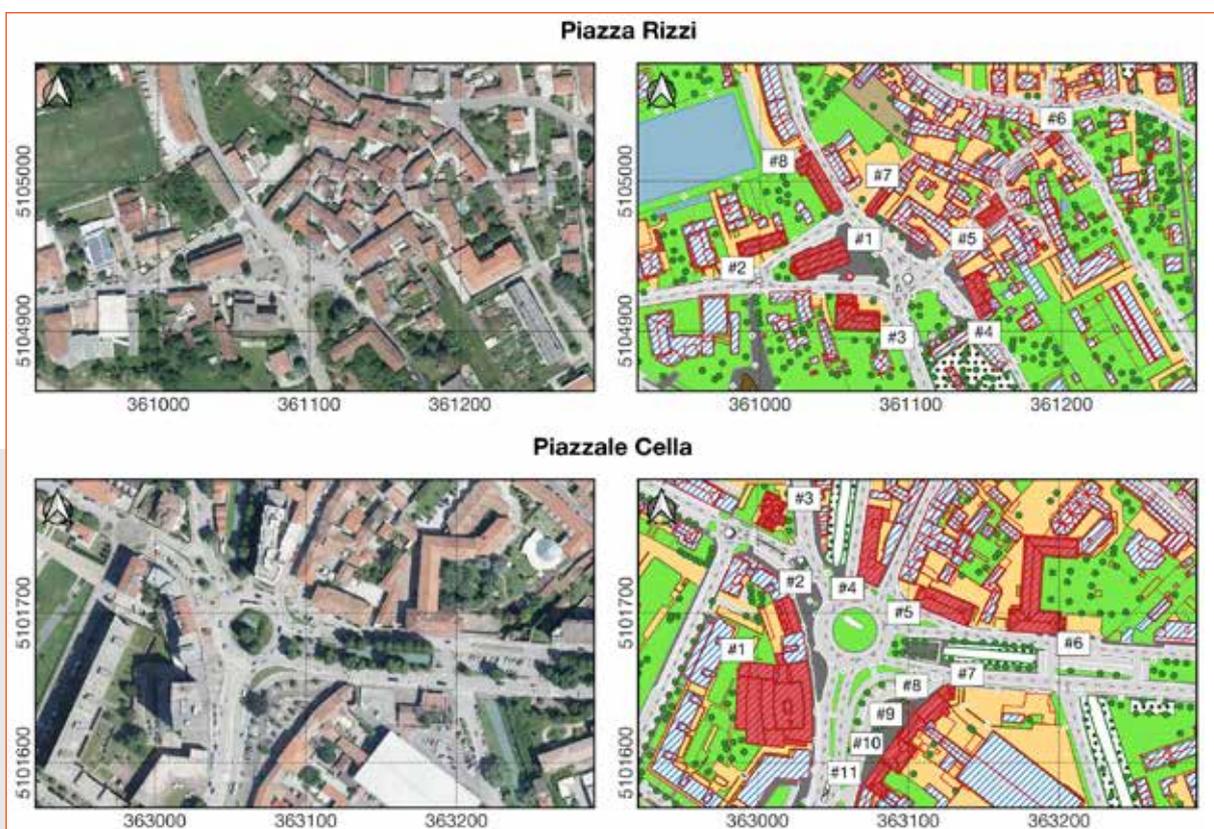


Figura 2: Ortofoto (a sinistra) e DBGT (vista dall'alto, a destra) delle due aree di studio nel comune di Udine. Gli edifici selezionati per la validazione delle metodologie di collaudo proposte sono evidenziati in rosso. Le coordinate sono espresse nel sistema cartografico RDN2008/UTM zona 33N (EPSG:6708).

lungo parte del percorso. Per quanto riguarda le acquisizioni, il rilievo di Piazza Rizzi ha richiesto circa 20 minuti di camminata lungo un tracciato di 1,1 km, seguito da circa 50 minuti di elaborazione completamente automatica. Il rilievo di Piazzale Cella, anch'esso di circa 20 minuti, si è sviluppato lungo un percorso più breve (800 m) e ha richiesto 35 minuti di post-processing. I due rilievi hanno generato nuvole di punti particolarmente dense (Figura 3): circa 151 milioni di punti per Piazza Rizzi e 103 milioni per Piazzale Cella. Entrambe le nuvole sono risultate correttamente georeferenziate nel sistema di riferimento ufficiale (EPSG:6708), grazie alla connessione NRTK alla rete regionale di stazioni permanenti GNSS "Antonio Marussi".

Prima di procedere ai confronti con il DBGT, le nuvole di punti SLAM sono state sottoposte a una validazione metrica preliminare mediante alcuni punti significativi misurati con ricevitore GNSS topografico. Gli scarti verticali medi, compresi tra 2 e 5 cm, hanno confermato la coerenza delle nuvole sia con le specifiche dichiarate dal costruttore sia con i valori riportati in letteratura per i sistemi SLAM di seconda generazione. Questa operazione preliminare è essenziale: dimostra infatti che la qualità metrica del rilievo SLAM è di un ordine

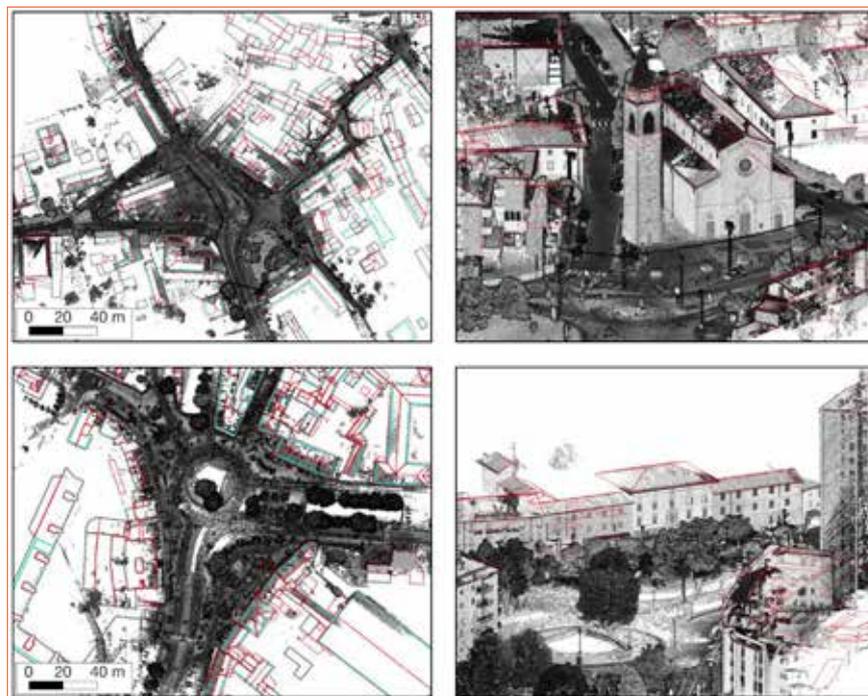


Figura 3: Vista dall'alto (a sinistra) e in 3D (a destra) delle nuvole di punti ottenute con laser scanner portatile a tecnologia SLAM per le due aree di studio. Sono sovrapposte le geometrie del database geo-topografico: le unità volumetriche degli edifici sono evidenziate in ciano e gli elementi di copertura in rosso. Nella vista 3D, per rendere l'immagine più leggibile, sono mostrati solo gli elementi di copertura.

di grandezza superiore rispetto ai requisiti di accuratezza previsti per un DBGT in scala 1:2000 (50 cm per la planimetria e 40 cm per l'altimetria). La nuvola di punti SLAM può quindi essere considerata del tutto idonea a fungere da dato di riferimento per le verifiche successive.

Una volta definita la metodologia e validato il dato SLAM, è stato possibile passare alla fase centrale dello studio, ossia la valutazione della coerenza metrica tra il rilievo tridimensionale e le geometrie contenute nel DBGT. I risultati presentati di seguito derivano

dall'applicazione delle tre procedure ai 19 edifici selezionati nelle due aree di test.

Le discrepanze tra la cartografia e il rilievo SLAM sono state sintetizzate mediante l'RMSE (*Root Mean Square Error*), calcolato separatamente per le componenti planimetriche (scarti sulle coordinate x e y) e per la componente altimetrica (scarto sulla quota z). La Tabella 1 riporta i valori aggregati ottenuti per ciascuna metodologia, considerando l'intero insieme degli edifici analizzati.

L'analisi degli scarti ha evidenziato comportamenti diffe-

| Metodologia | Unità Volumetriche | | Elementi di copertura | | |
|------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | n. punti | RMSE _{xy} [m] | n. punti | RMSE _{xy} [m] | RMSE _z [m] |
| "point-to-cloud" | 89 | 0,504 | 235 | 0,171 | 0,109 |
| "line-to-cloud" | 96911 | 0,334 | 187959 | 0,201 | 0,160 |
| "line-to-line" | 97653 | 0,312 | 185230 | 0,133 | 0,198 |

Tabella 1: Riepilogo dei risultati dei test condotti sui 19 edifici delle aree di studio Piazza Rizzi e Piazzale Cella. La tabella mostra anche il numero totale di punti utilizzati per misurare l'accuratezza (RMSE). Per le metodologie "line-to-cloud" e "line-to-line", il numero di punti è molto alto, perché le linee analizzate sono state campionate con una densità di 100 punti per metro.

renti a seconda della classe di oggetti. Gli elementi di copertura mostrano una coerenza molto buona rispetto al rilievo SLAM, con scarti planimetrici medi compresi tra 13 e 20 cm e scarti altimetrici tra 10 e 20 cm: valori del tutto compatibili con le tolleranze previste dai capitoli tecnici per la scala di riferimento. Le unità volumetriche, al contrario, presentano scarti più elevati, in alcuni casi dell'ordine di 30–50 cm, ma comunque coerenti con l'accuratezza planimetrica attesa per un DBGT alla scala 1:2000.

Il confronto tra le tre metodologie mette in luce differenze rilevanti. L'approccio "point-to-cloud" è risultato il più sensibile alla presenza di errori locali: un singolo vertice impreciso è sufficiente per incrementare sensibilmente l'RMSE dell'intero edificio. Un esempio significativo è quello dell'edificio #8 dell'area di Piazza Rizzi (Figura 4, in alto). In questo caso, un singolo vertice della relativa unità volumetrica presentava un errore marcato sul lato

destro, probabilmente dovuto ad un errore di interpretazione della geometria dell'edificio in fase di produzione della cartografia. Tale anomalia ha fatto crescere l'RMSE planimetrico (RMSE_{xy}) fino a 0,839 m, un valore che, preso isolatamente, porterebbe l'intero edificio a non superare il collaudo. Applicando invece le metodologie "line-to-cloud" e "line-to-line", che analizzano l'intera geometria anziché punti isolati, l'influenza di quell'errore locale si è notevolmente ridotta: l'RMSE è sceso rispettivamente a 0,422 m e 0,380 m, restituendo un quadro molto più aderente alla reale qualità della rappresentazione cartografica.

L'approccio "line-to-cloud" mostra una maggiore stabilità e una rappresentatività superiore delle geometrie. Tuttavia, rispetto al terzo approccio ("line-to-line"), il metodo "line-to-cloud" presenta un limite evidente, ben illustrato dal caso dell'edificio #1 nell'area di Piazza Rizzi (Figura 4, in basso). I laser scanner portatili sono infatti in grado

di acquisire dettagli dell'ordine del centimetro — come, in questo caso, gli elementi architettonici dei portali della chiesa. Si tratta però di particolari troppo fini per essere rappresentati nella cartografia tecnica: alla scala di riferimento del DBGT, tali elementi non dovrebbero essere inclusi nella geometria. Ne consegue che il confronto diretto tra la nuvola di punti SLAM e la linea vettoriale estratta dal DBGT può evidenziare discrepanze che, pur essendo reali nel rilievo, non hanno alcuna rilevanza alla scala cartografica prevista. Questo problema non si presenta nel metodo "line-to-line", dove la vettorializzazione viene eseguita adottando lo stesso livello di generalizzazione del DBGT (scala 1:2000 in questo studio), escludendo volutamente i dettagli superflui. L'esempio mostra chiaramente come l'approccio "line-to-line" consenta un confronto più equilibrato e coerente con la scala del prodotto cartografico. Oltre agli aspetti metrici, lo studio ha messo in evidenza anche importanti conside-

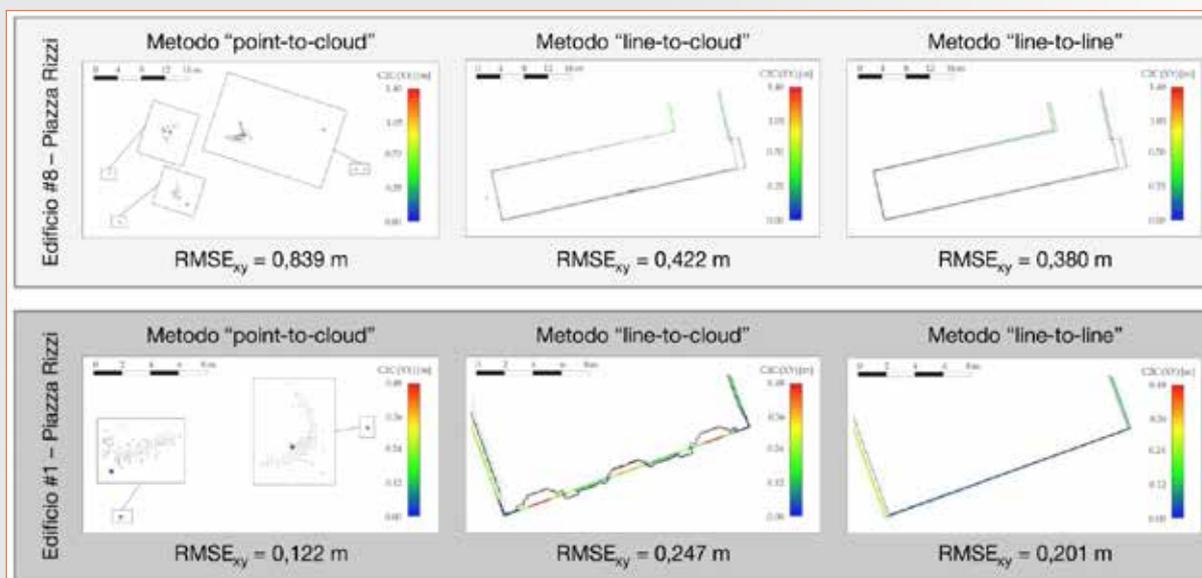


Figura 4: Alcuni esempi significativi delle differenze riscontrate con le tre metodologie di confronto, che evidenziano in particolare i vantaggi della procedura "line-to-line".



Figura 5: Esempi di confronto visivo tra le geometrie del database geo-topografico (in ciano le unità volumetriche degli edifici, in rosso gli elementi di copertura) e la nuvola di punti ottenuta con laser scanner portatile SLAM. Negli edifici mostrati si possono osservare chiaramente discrepanze tra i due dati ed errori presenti nella cartografia.

razioni di tipo operativo. Le acquisizioni SLAM si sono infatti dimostrate estremamente rapide ed efficienti: ciascuna area è stata rilevata in circa 20 minuti, seguiti da un'elaborazione automatica compresa tra 35 e 50 minuti, a seconda della lunghezza della traiettoria percorsa. Si tratta di tempi notevolmente inferiori rispetto a quelli necessari per una campagna topografica tradizionale, e difficilmente quest'ultima garantirebbe una copertura spaziale altrettanto completa del contesto urbano circostante.

È significativo osservare che, mentre le misure topografiche

tradizionali si concentrano su pochi punti molto visibili, una nuvola di punti SLAM permette di analizzare integralmente l'oggetto, evidenziando non solo scostamenti puntuali, ma anche deformazioni, allineamenti incoerenti, imprecisioni di modellazione e anomalie difficilmente rilevabili con un approccio puntuale. Molti di questi aspetti emergono in modo immediato grazie alla rappresentazione tridimensionale, come ben illustrato in Figura 5.

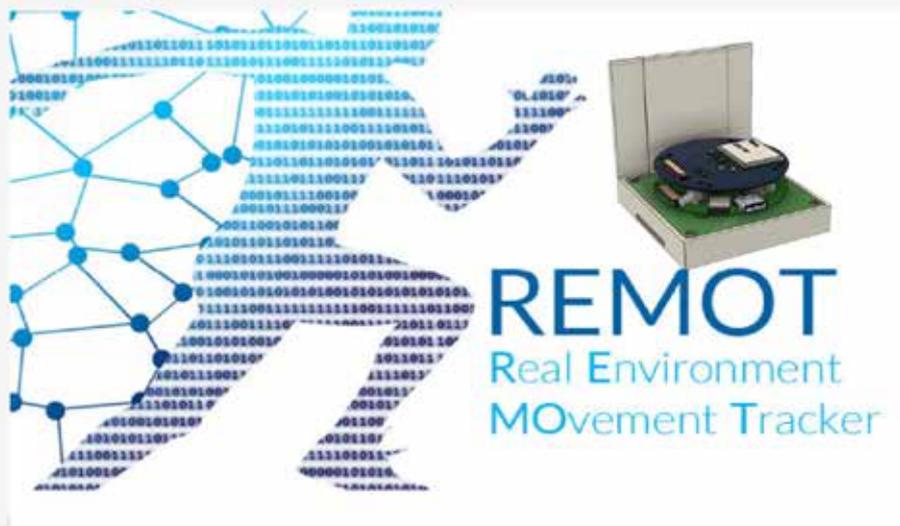
4. Il ruolo dei sistemi SLAM nella cartografia del futuro

La sperimentazione condotta

mostra con chiarezza come i sistemi SLAM possano assumere un ruolo significativo nel futuro della cartografia ufficiale, non più soltanto come strumenti di supporto, ma come veri e propri elementi centrali nei processi di produzione, aggiornamento e verifica. L'accuratezza raggiunta da questi dispositivi è ormai adeguata per eseguire controlli metrici su DBGT a grande scala, mentre l'elevata efficienza operativa permette di affrontare attività che, con gli strumenti tradizionali, risulterebbero troppo onerose in termini di tempo e risorse. L'impiego di laser scanner



remotproject.eu



REMOT



R&D projects

portatili in ambito cartografico può tuttavia estendersi ben oltre la fase di collaudo. La rapidità di acquisizione rende la tecnologia SLAM particolarmente promettente anche per le attività di aggiornamento della cartografia tecnica: un singolo operatore può rilevare intere aree urbane in tempi molto ridotti, individuando nuovi volumi, ampliamenti di edifici o trasformazioni dello spazio pubblico. La densità dei punti acquisiti consente inoltre di integrare queste informazioni con i dati provenienti da rilievi aerei, laser scanning o fotogrammetrici, contribuendo a generare un quadro tridimensionale completo a supporto della costruzione di modelli urbani 3D e digital twin. Un ulteriore ambito applicativo particolarmente interessante è quello del change detection. Ripetendo il rilievo della stessa area in epoche diverse, è possibile identificare variazioni morfologiche, nuove edificazioni, cambiamenti nella vegetazione o mutamenti nelle strutture esistenti. In questo contesto, la stabilità dei sistemi SLAM e la rapidità delle operazioni rappresentano vantaggi determinanti per applicazioni periodiche o continuative. Nonostante le potenzialità evidenziate, permangono alcune sfide, in particolare legate alla post-elaborazione delle nuvole di punti. Per i metodi di collaudo proposti in questo studio sarà fondamentale aumentare il grado di automazione. La segmentazione automatica delle nuvole — oggi tra i temi di ricerca più caldi nel settore della geomatica — consentirà di separare in modo affidabile le diverse classi di oggetti e di velocizzare il confronto con le geometrie del DBGT.

L'integrazione con algoritmi di intelligenza artificiale potrà inoltre facilitare l'individuazione automatica delle difformità, la ricostruzione vettoriale direttamente dalla nuvola di punti e il riconoscimento di pattern tipici nelle geometrie edilizie.

In definitiva, l'esperienza maturata in questo studio suggerisce che l'impiego dei

sistemi SLAM non rappresenti solo un'evoluzione tecnologica, ma una reale opportunità per rendere i processi cartografici più efficienti, completi e affidabili: una direzione che, con il consolidarsi degli sviluppi futuri, potrebbe ridefinire in modo strutturale il modo in cui costruiamo, aggiorniamo e verifichiamo la cartografia ufficiale.

FORNITORE ORIGINALE

Il presente articolo è un estratto, tradotto e rivisitato, del lavoro: Maset, E., Matellon, A., Gubiani, S., Visintini, D., & Beinat, A. (2025). Introducing SLAM-Based Portable Laser Scanning for the Metric Testing of Topographic Databases. *Remote Sensing*, 17(19), 3316. <https://doi.org/10.3390/rs17193316>

Si rimanda a questo articolo per ulteriori approfondimenti tecnici e per la bibliografia completa.

PAROLE CHIAVE

SLAM, LiDAR, POINT CLOUDS, GDBT, 3D MAPPING, URBAN D

ABSTRACT

This article explores the use of SLAM-based portable laser scanning systems as a metric reference for validating Geo-Topographic Databases (GTDB). As the demand for accurate and reliable geospatial data grows — driven by applications such as 3D urban models and digital twins — the need for efficient and comprehensive quality checks of official cartography is increasingly critical. Traditional GTDB verification relies on point-based topographic surveys, accurate but limited in geometric representativeness and often time-consuming.

The study evaluates three comparison methodologies between GTDB geometries and SLAM point clouds — point-to-cloud, line-to-cloud, and line-to-line — tested on 19 buildings in two urban areas in Udine (Italy). Results demonstrate that geometry-based approaches, particularly line-to-line, provide more robust assessments aligned with the target scale (1:2000), reducing the impact of local errors and irrelevant architectural details. SLAM acquisitions proved highly efficient, enabling full-area surveys in about 20 minutes.

The findings confirm that SLAM technology offers a viable solution for metric certification of GTDB and a promising tool for future cartographic updating and change detection. With advances in automated point-cloud processing and AI-driven feature extraction, SLAM could become a key component in official cartographic workflows.

AUTORE

ELEONORA MASET

ELEONORA.MASET@UNIUD.IT

DIPARTIMENTO POLITECNICO DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA (DPIA), UNIVERSITÀ DEGLI

STUDI DI UDINE, VIA DELLE SCIENZE 206, 33100 UDINE