

VALUTAZIONI DI QUALITA' TRA SISTEMI DI ACQUISIZIONE MOBILE E LASER SCANNER STATICI PER LO STUDIO PRELIMINARE DI UN BENE ARCHITETTONICO

A. Ferro, M. Lo Brutto

Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, Italy, (alessandra.ferro01, mauro.lobrutto)@unipa.it

Parole chiave: rilievo 3D, Laser scanning, HMLS, SLAM, nuvola di punti, Valutazione accuratezza.

Key words: 3D survey, Laser scanning, HMLS, SLAM, Point Cloud, Accuracy Assessment.

Abstract

Nell'ambito delle procedure di rilievo e modellazione 3D, si sta sempre più evidenziando la necessità di acquisire dati con modalità sempre più rapide e operativamente semplici, che consentano di ottimizzare al massimo i tempi di rilievo. I nuovi flussi di lavoro tendono pertanto a limitare l'utilizzo di tradizionali sistemi di scansione statica, evolvendosi verso approcci di mappatura in movimento che consentono notevoli risparmi di tempo. Tra i vari sistemi ad oggi presenti sul mercato, i sistemi laser scanner mobili portatili (*Handheld Mobile Laser Scanner - HMLS*) basati sulla tecnologia *SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping*), stanno assumendo crescente attenzione per il rilievo architettonico e edilizio, anche per la loro adattabilità a situazioni in cui sarebbe difficile l'utilizzo di altri sistemi di acquisizione tridimensionale. Seppure questi sistemi siano già ampiamente diffusi, l'accuratezza e l'affidabilità dei dati acquisiti non è ancora stata adeguatamente verificata in relazione alle differenti situazioni di rilievo. Pertanto, allo stato attuale le nuvole di punti acquisite con dispositivi statici rappresentano la soluzione teoricamente più precisa. Il lavoro affronta tale problema proponendo una valutazione preliminare tra dati acquisiti con un laser scanner mobile portatile e un sistema laser scanner statico. Le valutazioni sono state eseguite nell'ambito dell'attività di ricerca condotta per il rilievo e la documentazione del complesso di Santa Maria della Grotta a Marsala (Italia).

In 3D surveying and modelling, the need to acquire data in an ever faster and easier-to-use manner is becoming increasingly apparent, so survey times can be optimised as much as possible. New workflows therefore tend to limit the use of traditional static scanning systems and move towards approaches that offer significant time savings. Among the several available systems, Handheld Mobile Laser Scanner (HMLS) systems based on SLAM (Simultaneous Localisation and Mapping) technology are gaining increasing attention for architectural and building surveying, also due to their adaptability for situations where it would be difficult to use other three-dimensional acquisition systems. Although these systems are already widely used, the accuracy and reliability of the acquired data have not yet been properly verified in relation to different survey situations. Therefore, at present, point clouds acquired with static devices represent the theoretically most accurate solution. The paper addresses this problem by proposing a preliminary evaluation between data acquired with a portable mobile laser scanner and a static laser scanner system. The evaluations were carried out within the framework of the research activity conducted for the survey and documentation of the "Santa Maria della Grotta" complex in Marsala (Italy).

1. Introduzione

Nell'ultimo decennio, grande attenzione è stata posta al tema della definizione di flussi di lavoro Scan-to-BIM per integrare i dati provenienti da scansioni laser scanner e da rilievi fotogrammetrici all'interno dell'ambiente BIM, al fine di ottenere modelli parametrici degli edifici esistenti sempre più accurati e dettagliati (Rocha et al 2020). I requisiti tecnici e le potenzialità degli strumenti e dei metodi per il rilievo di oggetti come edifici, beni architettonici, infrastrutture civili, ambienti industriali, ecc., sono ben noti e ben documentati. Però, anche se queste tecniche hanno raggiunto un notevole livello di maturità, diversi aspetti nell'ambito del processo Scan-to-BIM richiedono ulteriori ricerche e approfondimenti come, per esempio, lo studio sul corretto approccio per la loro eventuale integrazione, il loro utilizzo in relazione al livello di dettaglio da perseguire per il modello BIM, ecc. (Pocobelli et al., 2020).

Come è noto, il rilievo laser scanner terrestre consiste prevalentemente in un metodo di acquisizione statica in cui lo strumento viene posizionato in un punto sul terreno da dove acquisisce tutti i punti 3D visibili sull'oggetto del rilievo. Reiterando la procedura su tutto il sito, all'interno dell'area interessata, si ottengono le nuvole di punti che descrivono

l'oggetto. Sebbene questa risulti essere una procedura ampiamente utilizzata che fornisce un'elevata precisione per la ricostruzione digitale tridimensionale degli oggetti rilevati, alcuni evidenti inconvenienti relativi alle procedure di acquisizione dati sono ancora presenti. Questi riguardano la necessità del posizionamento manuale del laser scanner su più punti di acquisizione, il controllo delle adeguate sovrapposizioni tra le scansioni, la necessità dell'integrazione con rilievi di tipo topografico soprattutto per la misura delle coordinate dei target necessari alla fase di registrazione (Tucci et al., 2018). Tutto questo comporta una fase di acquisizione dati che, in relazione all'estensione e alla complessità del sito, può diventare anche molto lunga e onerosa.

Per tale motivo, negli ultimi anni, la disponibilità di sistemi laser scanner mobili basati sulla tecnologia *SLAM* (*Simultaneous Location and Mapping*) si è rivelata una valida alternativa alle acquisizioni con laser scanner statico per un ampio campo di applicazioni, soprattutto per siti e aree molto estese e complesse (Sammartino e Spanò, 2018). Questi sistemi consentono di acquisire i dati spostandosi nell'area da misurare e possono essere tenuti in mano direttamente dall'operatore (i cosiddetti *handheld system*), posizionati all'interno di zaini che vengono indossati da un operatore (*backpack system*) oppure fissati su

carrelli o supporti mobili spinti dall'operatore (*trolley system*) (Otero et al., 2020).

Nei sistemi laser scanner mobili basati sulla tecnologia SLAM la "localizzazione" implica la stima della posizione e dell'assetto di un sensore (di misura) rispetto ad un determinato sistema di coordinate, mentre la "mappatura", è intesa come l'output finale del sensore, sotto forma di nuvola di punti dell'ambiente rilevato (Tucci et al., 2018). In sintesi, con un algoritmo SLAM è possibile costruire contemporaneamente una mappa e localizzare il sensore all'interno della mappa stessa.

Negli ultimi anni, molti sensori commerciali che supportano la tecnologia SLAM per la generazione di nuvole di punti, sono stati introdotti sul mercato e gli algoritmi sono stati costantemente migliorati, con un panorama di soluzioni abbastanza diversificato per le diverse situazioni (Hyypä et al., 2020).

Per questo motivo ad oggi i sistemi laser scanner mobili portatili (*Handheld Mobile Laser Scanner* - HMLS) sono molto utilizzati, soprattutto perché in grado di digitalizzare scenari complessi sia in ambienti interni che in spazi esterni senza ricorrere al posizionamento satellitare (Del Duca e Machado, 2022). I dispositivi HMLS possono essere molto vantaggiosi soprattutto in spazi ristretti con occlusioni (Corrao et al., 2021) o in aree estese con presenza di fitta vegetazione e terreni irregolari (Aricò et al. 2023).

Sebbene questi nuovi dispositivi siano tecnologie in rapida evoluzione e mostrino un grande potenziale, ad oggi, non si ha ancora una standardizzata valutazione sulle loro effettive potenzialità, in relazione anche ai diversi contesti di utilizzo e alle finalità del lavoro di rilievo. Infatti, spesso l'inferiore densità dei punti acquisiti rispetto alle tecniche di misura statiche e il "rumore" più elevato che potrebbe presentarsi nei dati ottenuti da tali dispositivi, potrebbero ridurre la loro capacità di ricostruire dettagli architettonici, soprattutto in quelle applicazioni rivolte principalmente al rilievo dei Beni Culturali. In particolare, nella modellazione parametrica in ambiente BIM la generazione di elementi architettonici complessi e non presenti all'interno dei database BIM, potrebbe risultare difficoltosa o non garantire una adeguata corrispondenza con l'oggetto reale (Sammartino et. al, 2021).

Risulta pertanto utile fare delle valutazioni, che consentano di definire potenzialità e limiti di questi sistemi. Il lavoro è stato pertanto finalizzato ad eseguire un primo confronto tra dati acquisiti con un HMLS basato su tecnologia SLAM e dati acquisiti con un tipico laser scanner statico. Il confronto è stato eseguito nell'ambito delle attività di rilievo del complesso di Santa Maria della Grotta, a Marsala. Tale attività è finalizzata a realizzare un modello parametrico in ambiente HBIM della chiesa e rientra in un più ampio progetto di ricerca per la digitalizzazione e gestione in ambiente GIS di tutte le aree archeologiche di Marsala di pertinenza del Parco Archeologico di Lilibeo-Marsala.

La scelta di effettuare il rilievo con un sistema HMLS è dovuta alla complessità e alla particolarità dell'intero sito che integra sia componenti architettoniche (la chiesa), ma anche aree ed emergenze archeologiche molto più complesse da rilevare. La ricerca tende a definire quali potrebbero essere i vantaggi e, contestualmente, i limiti nell'utilizzare strumenti HMLS piuttosto che laser scanner statici per il rilievo di siti abbastanza particolari come quello in oggetto.

Il lavoro è stato svolto utilizzando il sistema HMLS Geoslam Zeb Horizon RT, che è stato impiegato per il rilievo dell'intero sito. Le operazioni di confronto sono state fatte limitando l'area di interesse esclusivamente agli ambienti interni della Chiesa di S. Maria della Grotta utilizzando dati acquisiti con un laser scanner statico Faro Focus 3D S120.

2. Il caso studio

Il caso studio riguarda il complesso di Santa Maria della Grotta a Marsala (Italia). Il complesso è costituito da una chiesa di epoca tardo-barocca ricavata all'interno di un antico complesso ipogeico (Figura 1). La chiesa è parzialmente scavata nella roccia ed è stata costruita in un'area caratterizzata dalla presenza di ipogei preesistenti. Tali ipogei hanno avuto nel tempo varie funzioni, in età punica erano stati in parte usati come necropoli, successivamente sono stati trasformati in latomie e poi sfruttate per diversi utilizzi come, per esempio, per luoghi di culto. La chiesa si colloca in posizione centrale rispetto agli ipogei preesistenti e rappresenta l'unico punto di accesso all'intero complesso. L'accesso alla chiesa avviene tramite una scalinata che colma il dislivello del piano di campagna dell'area circostante e il piano di calpestio della chiesa.

La vasta area in cui sorge il complesso vanta una storia millenaria e molto complessa dovuta alle diverse funzioni che, nel corso dei secoli, ha dovuto assolvere.

Le prime testimonianze sull'area risalgono alla nascita della città punica di Lilibeo (V sec. a.C. e inizi del IV sec. a.C.); in questa prima fase l'area fu destinata a necropoli, come documentano le numerose tombe ipogeiche a pozzo verticale (in un caso con camera funeraria) e a fossa rettangolare o quadrangolare, utilizzate per inumazioni ed incinerazioni entro anfore.

Nella seconda fase, tra la fine del II sec. e il III sec. d.C., l'area fu utilizzata per la cavatura della pietra necessaria all'espansione edilizia della città.

Successivamente, in epoca paleocristiana, le latomie cessarono la loro attività e vennero destinate ad area cimiteriale.

Nella quarta fase intorno al XV secolo, nell'area delle latomie fu costruita una abbazia denominata "Santa Maria della Grotta", in quanto parzialmente sotterranea, affidata all'ordine dei Gesuiti, che la detengono fino allo scioglimento definitivo dell'Ordine, avvenuto nel 1860 (Giglio, 1997).



Figura 1. Chiesa di S. Maria della Grotta.

Le vicende della chiesa tra la metà del Cinquecento e il Settecento sono poco note, ma varie testimonianze pittoriche dimostrano che il complesso ipogeico continuò ad essere frequentato per l'uso liturgico anche in questo periodo.

La fase edilizia e monumentale più rilevante della chiesa risale al XVIII secolo, quando i padri gesuiti affidarono il progetto di rifacimento della più antica chiesa ipogea, rovinata per la forte umidità, all'architetto trapanese Giovan Biagio Amico.

La chiesa barocca, ricavata all'interno dell'antico complesso ipogeico, consiste in una grande aula a navata unica, interamente rivestita di stucco bianco e scandita da ingressi laterali (due per lato) che introducono nelle zone degli ipogei. I due ipogei sono

ubicati rispettivamente a Sud e a Nord della chiesa (Figura 2); il primo dalla pianta irregolare simile, grosso modo, ad una L; il secondo costituito da tre piccoli vani di forma quadrangolare disposti sullo stesso asse e da un gruppo di ambienti più al Nord, ai quali si accede per mezzo di tre rampe di scale.

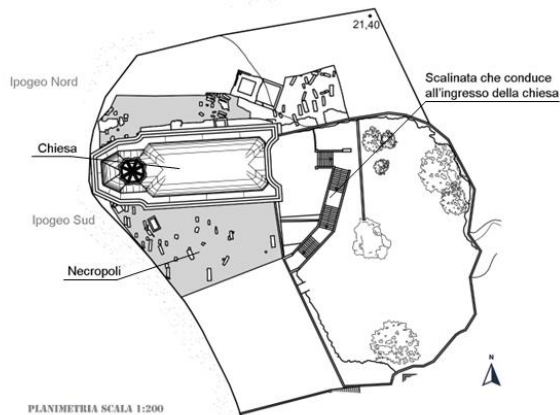


Figura 2. Planimetria dell'area del complesso di Santa Maria della Grotta.

La copertura, molto più alta rispetto a quella della chiesa precedente, fu coronata da una cupola rivestita da mattonelle verdi e scandita da costoloni in tufo. Una balaustra, posta in alto lungo il cornicione della chiesa e un accesso scenografico, costituito da un'ampia scalinata a rampe spezzate, completavano l'opera (Casano Del Puglia R., 2012).

La porta di accesso rimase nella posizione precedente e al di sopra venne ricavato un occhio come fonte di luce.

Passata al Demanio dello Stato nel 1866, la chiesa rimase aperta al culto fino al 1968, quando a causa dei crolli provocati dal terremoto e ai successivi danni provocati dalle piogge nel 1976 venne definitivamente chiusa e lasciata in uno stato di abbandono. Questa situazione provocò il trafugamento della balaustra del coronamento e il crollo nel 1978 della torre normanna (Caruso, 1998).

Da alcuni anni l'area è diventata di competenza del Parco Archeologico di Lilibeo-Marsala che provvede al suo mantenimento e alla messa in sicurezza dei luoghi anche se il complesso è ancora oggi in uno stato di parziale abbandono (Figura 3). Inoltre, nuove costruzioni vanno sorgendo attorno all'area privando il contesto dei suoi tratti peculiari.

Nonostante tutto, l'area rimane ancora oggi una preziosa testimonianza sia del patrimonio archeologico, artistico e culturale di Marsala, e rappresenta un sito di notevole importanza sia dal punto di vista storico sia per le sue particolarità morfologiche.



Figura 3. Vista interna della Chiesa di Santa Maria della Grotta.

3. Acquisizione e elaborazione dati

L'attività di rilievo del complesso è stata definita a seguito di un sopralluogo preliminare che ha permesso di individuare la strategia migliore per l'acquisizione dati. In particolare, la singolare morfologia del complesso con un'alternanza di zone ampie e prive di ostacoli (la navata centrale della chiesa) e zone ristrette con angusti passaggi (gli ipogei) rendeva particolarmente difficoltosa il rilievo tridimensionale dell'intero complesso con un laser scanner statico. Per questo motivo si è optato per l'utilizzo di un HMLS che consentisse il rilievo in tempi rapidi e senza particolari problemi di registrazione delle nuvole di punti dell'intero complesso.

Il rilievo dell'intera area (ambienti interni della Chiesa, ipogei e spazi esterni) è stato pertanto eseguito con uno strumento GeoSLAM Zeb Horizon RT. Tale strumento garantisce di rilevare fino ad una distanza di 100 metri acquisendo 300.000 punti al secondo e permette di raggiungere precisioni fino ai 6 mm se i dati vengono processati con il software proprietario GeoSLAM Connect V2. La nuvola di punti prodotta durante il rilievo può essere visualizzata in tempo reale tramite un tablet collegato con il sistema di acquisizione e la sua densità dipende dalla velocità dell'operatore; più lentamente viene eseguito il movimento del sensore, maggiore sarà la densità dei punti misurati.

Il rilievo del complesso ha previsto una suddivisione delle acquisizioni in tre diversi percorsi, in cui i primi sono stati condotti per rilevare la facciata esterna, l'intera navata centrale e gli ipogei laterali (Figura 4). Il terzo percorso è stato invece eseguito per acquisire le facciate esterne dell'edificio percorrendo il perimetro dell'edificio. Questo percorso ha comunque previsto anche un passaggio all'interno per ri-acquisire la navata centrale della chiesa, in modo tale che tutti i percorsi eseguiti abbiano sempre una porzione comune sufficientemente ampia.

Poiché ogni percorso risulta avere un sistema di riferimento autonomo è stato necessario posizionare un numero adeguato di punti di controllo lungo il percorso, utili per riallineare i vari percorsi. Complessivamente sono stati collocati nove punti, sia all'interno della Chiesa, sia sulla parte di collegamento esterno; le coordinate di questi punti sono state ottenute stando con lo strumento su ogni punto per circa 10 secondi. Uno dei punti esterni è stato definito come punto di partenza di tutti i percorsi.

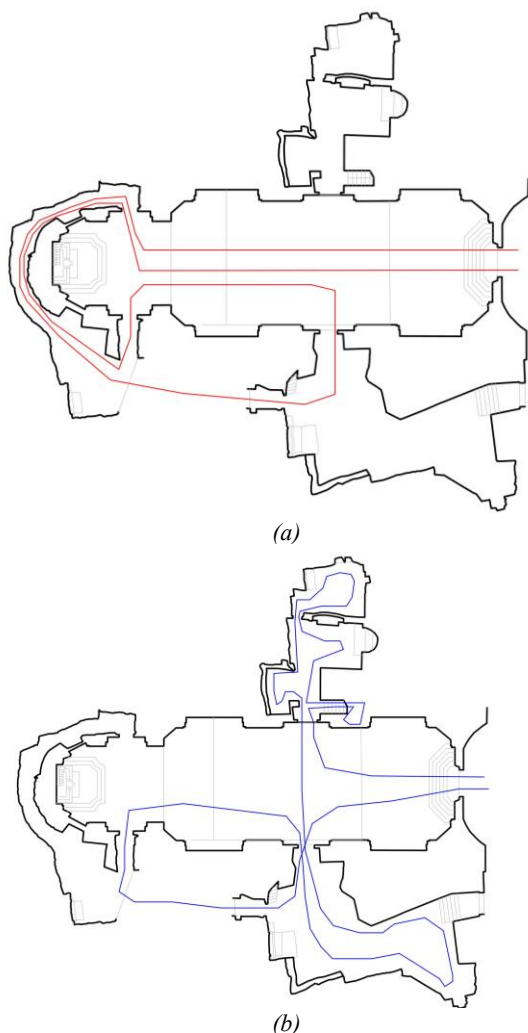


Figura 4. Percorsi eseguiti con ZEB HORIZON: (a) primo percorso (b) secondo percorso.

Il rilievo HMLS ha prodotto tre distinte nuvole di punti, relative ai tre diversi percorsi effettuati e si è dimostrato particolarmente utile per le zone degli ipogei, in cui è stato possibile raggiungere spazi angusti e praticamente impossibili da rilevare con qualsiasi altro tipo di tecnologia.

Per poter elaborare e processare i file, è stato necessario utilizzare inizialmente il software proprietario GeoSLAM Hub, attraverso il quale è stata effettuata una prima operazione di roto-traslazione dei percorsi per riferirli ad un unico sistema di riferimento. Questa operazione è stata condotta utilizzando le coordinate dei punti di controllo posizionati lungo il percorso. Successivamente, l'allineamento è stato ulteriormente migliorato attraverso una procedura automatica di registrazione Cloud-to-Cloud.

Il processamento ha consentito di ottenere una nuvola di punti complessiva dell'intero sito, ad esclusione delle parti non raggiungibili dall'operatore, come le coperture esterne.

Ai fini di un confronto con dati acquisiti con un laser scanner statico si è proceduto a rilevare, tramite un laser scanner Faro Focus 3D S120, tutta la navata principale della chiesa. La scelta di limitare l'area di confronto solo alla navata della chiesa è dovuta sia all'oggettiva difficoltà operativa di rilevare con un laser scanner statico tutte le altre zone, sia al fatto che la parte architettonica della chiesa, con le sue forme geometriche ben definite, si prestava meglio per la fase di confronto. Il Faro Focus 3D S120 è uno strumento molto noto e utilizzato nel campo del rilievo dei beni culturali caratterizzato da un campo visivo a 360°

sull'asse orizzontale e 300° sull'asse verticale, una portata di 120 m e una precisione teorica nella misura della distanza di ± 2 mm. Il rilievo con il laser scanner Faro Focus 3D S120 è stato pianificato ed eseguito prevedendo il posizionamento dello strumento in quattro punti interni lungo l'asse mediano della navata (Figura 5).

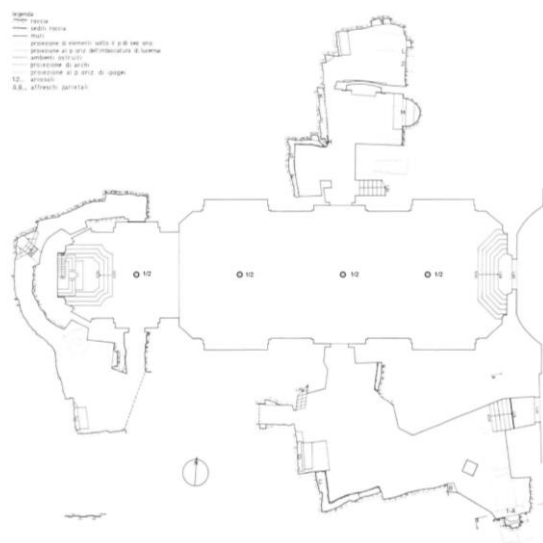


Figura 5. Schema delle prese con il laser scanner Faro Focus 3D (planimetria da Caruso, 1998)

Per elaborare le nuvole di punti misurate con il laser scanner Faro Focus è stato utilizzato il software ReCap Pro di Autodesk; il processamento ha previsto l'importazione delle scansioni e la successiva fase di registrazione automatica delle stesse.

Per poter eseguire le operazioni di confronto è stato necessario allineare i due dataset, quello ottenuto con il HMLS e quello ricavato dal laser scanner Faro, in modo tale da posizionarli nello stesso sistema di riferimento e renderli sovrapponibili. Quest'ultimo passaggio è stato effettuato applicando una registrazione Cloud-to-Cloud con il software CloudCompare; è stato eseguito un primo allineamento per punti omologhi e, successivamente, per migliorare il risultato, è stato effettuato un allineamento automatico con l'algoritmo ICP.

4. Confronto nuvole di punti

Il confronto tra i due dataset è stato eseguito inizialmente in modo qualitativo determinando la densità (*density*) e la "rugosità" (*roughness*) dei punti; successivamente è stato fatto anche un confronto di tipo quantitativo tramite il calcolo della distanza tra le nuvole di punti.

Per il confronto qualitativo relativo alla densità (*density*) e alla "rugosità" (*roughness*) è stato scelto di fare riferimento ad un singolo percorso del rilievo HMLS e ad una singola scansione del laser scanner statico; questa scelta è stata fatta in modo tale che i parametri di confronto (*density* e *roughness*) non fossero influenzati dalla sovrapposizione di dati provenienti da acquisizioni differenti.

Per quanto riguarda invece, il successivo confronto, si è fatto riferimento alla nuvola di punti complessiva ottenuta dopo i vari step di processamento. In questo caso si è ritenuto più opportuno utilizzare in entrambi i casi il dataset finale in quanto rappresenta il dato effettivo sul quale possono poi essere eseguite eventuali operazioni di modellazione. Le differenti analisi sono state tutte condotte principalmente utilizzando i *tools* presenti nel software open source CloudCompare.

4.1 Analisi della densità e rugosità delle nuvole di punti

La valutazione relativa alla densità (*density*) e alla “rugosità” (*roughness*) è stata condotta considerando solo una porzione della navata; tale area corrisponde ad una nuvola di punti di circa 10 milioni di punti per il dataset HMLS e di circa 35 milioni di punti per il dataset del rilievo statico (Figura 6).

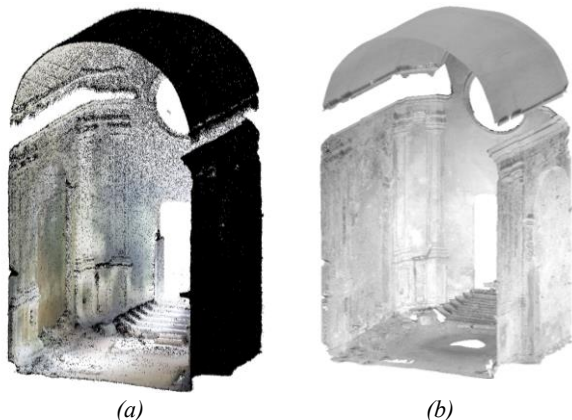


Figura 6. Porzione della nuvola di punti HMLS (a) e del rilievo statico (b).

Il software Cloud Compare offre la possibilità di stimare la densità e la rugosità delle nuvole di punti attraverso il comando “*Compute geometric features*”; in particolare per la densità si può fare riferimento a:

- “*Number of neighbors*”, nonché il numero di punti vicini;
- “*Surface density*”, ovvero il numero di punti vicini diviso la superficie ($=N/\pi r^2$);
- “*Volume density*”, ovvero il numero di punti vicini diviso il volume ($=N/\pi r^3$);

Per questo studio è stato scelto di calcolare il “*Volume density*” attraverso il quale la densità viene stimata determinando il numero di punti contenuti in un intorno locale di una sfera. Il raggio della sfera è variabile e può essere arbitrariamente scelto dall’operatore; nel nostro caso, a seguito delle diverse prove eseguite, è stato ritenuto idoneo assumere un valore pari a 0.01 m.

I risultati del processo vengono memorizzati come campi scalari e possono essere rappresentati mediante una mappatura di colori sulla nuvola di punti (Figura 7).

Nel rilievo HMLS la distribuzione dei dati presenta valori di densità nettamente inferiori per l’intera porzione; questo è abbastanza evidente nella figura 7a in cui la maggior parte dei punti fa riferimento ai valori più bassi della legenda. Si può però notare come ci sia una densità pressoché costante nell’area considerata.

La densità della nuvola di punti ottenuta da laser scanner statico è invece caratterizzata da una minore uniformità della distribuzione dei punti, soprattutto nelle zone d’ombra provocate dagli elementi architettonici come le paraste o le zona di imposta della volta, ma da una densità media nettamente superiore (Figura 7b).

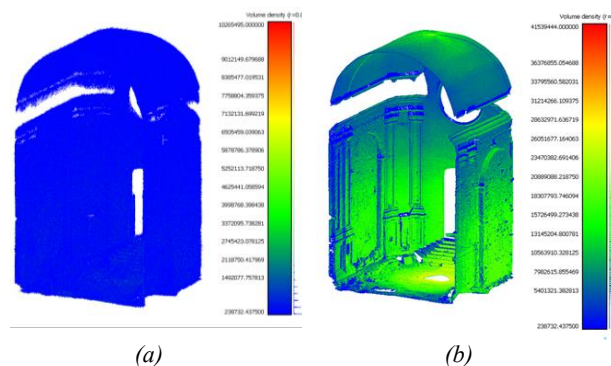


Figura 7. Confronto della densità per HMLS (a) e laser scanner statico (b)

Tali considerazioni sono ulteriormente confermate dal confronto tra gli istogrammi in figura 8, in cui sull’asse delle ascisse vengono riportati i valori di densità calcolati per un raggio di 0.01 m, mentre sull’asse delle ordinate il numero di punti corrispondenti.

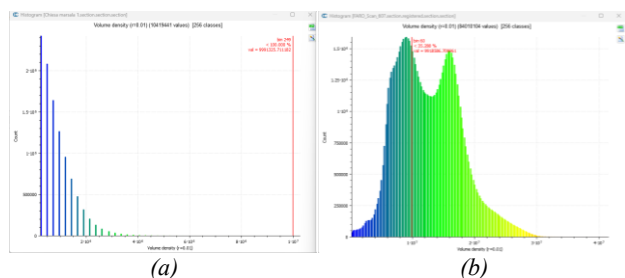


Figura 8. Istogramma per la valutazione della densità HMLS (a) e laser scanner statico (b).

Prendendo un valore di riferimento di densità, ad esempio 1×10^7 , è possibile notare che tutti i punti HMLS risultano inferiori a tale valore, mentre per il laser scanner statico soltanto il 35% dei punti. Questo fa intuire come la densità dei punti per le acquisizioni con laser scanner statico sia di gran lunga superiore rispetto l’acquisizione HMLS, con valori di densità che vanno da 1×10^7 fino a 3×10^7 , mentre la totalità dei punti del rilievo HMLS risulta avere una densità inferiore ad un valore di 4×10^6 .

L’inferiore densità dei punti che caratterizzano i dispositivi HMLS è un fattore determinante nella valutazione del livello di dettaglio della nuvola di punti ottenuta che, se risulta non adeguato, riduce la capacità di ricostruire soprattutto i dettagli architettonici.

Il secondo parametro considerato è la “rugosità” (*roughness*). CloudCompare da una stima del *roughness* come la distanza tra un punto ed il piano medio calcolato sui punti più vicini, secondo una sfera di raggio variabile. Anche in questo caso si è optato per una sfera di raggio pari a 0.01 m.

Nella figura 9 è possibile notare una evidente differenza nella stima della “rugosità” della nuvola di punti; tale risultato era ovviamente abbastanza scontato considerando le due diverse modalità di acquisizione. Nel dettaglio, guardando l’istogramma in figura 10, la distribuzione dei punti secondo il metodo della “rugosità” evidenzia che i punti sulle superfici sono per il 97% a distanze inferiori a 0.02 m per il laser scanner statico, mentre l’HMLS genera più rumore in tutta la scena, descrivendo una curva più ampia, in cui solo il 56% dei punti si trova a distanze inferiori ai 0.02 m. Questo aspetto potrebbe contribuire ad ottenere informazioni meno accurate nella definizione delle superfici e dei confini degli oggetti scansionati.

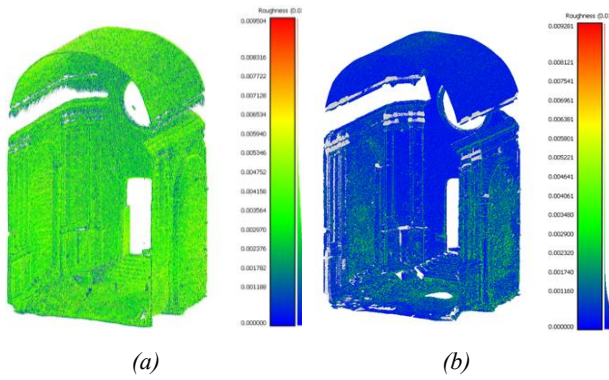


Figura 9. Confronto della “rugosità” per HMLS (a) e laser scanner statico (b).

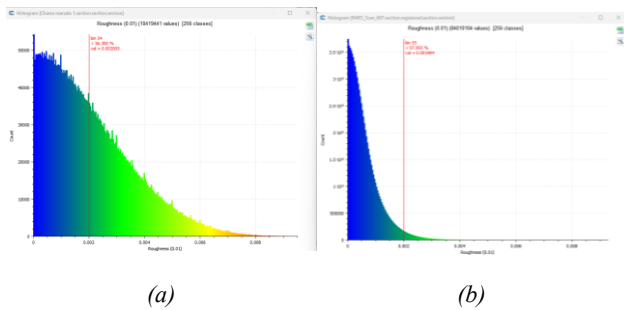


Figura 10. Confronto della “rugosità” per HMLS (a) e per il laser scanner statico (b).

4.2 Calcolo della distanza tra le nuvole di punti

Per il confronto quantitativo tramite il calcolo della distanza tra le nuvole di punti è stato preventivamente necessario sottocampionare i due dataset in quanto i dati finali del processamento sono risultati troppo difficili da gestire. Il ricampionamento è stato eseguito con il software CloudCompare nella modalità “space” imponendo valori di distanza minima tra i punti di 0.005 m; inoltre, per avere una porzione che fosse molto regolare dal punto di vista geometrico si è scelto di analizzare unicamente la parte dell'intradosso della volta. I due dataset sono risultati approssimativamente pari a circa 9 milioni di punti ciascuno (Figura 11), consentendo in questo modo di avere due porzioni approssimativamente equivalenti dal punto di vista della densità dei punti.

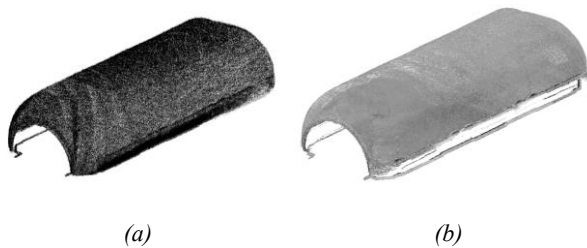


Figura 11. Nuvola di punti HMLS (a) e laser scanner statico (b).

Il confronto è stato eseguito con il comando *C2C distance* (*Cloud to-cloud distance*) di CloudCompare, stimando la distanza assoluta che intercorre tra le due nuvole di punti. Per il confronto è stata impostata la nuvola di punti acquisita con Faro Focus 3D come riferimento, da cui è stata calcolata la deviazione dei dati riferiti al rilievo HMLS.

Nella procedura *C2C distance* è possibile specificare un valore soglia oltre il quale la distanza non viene ulteriormente stimata; in questo studio è stata assunta una distanza di 0.1 m.

La nuvola di punti è stata colorata sulla base del campo scalare delle differenze, in modo tale da poter vedere graficamente le porzioni più o meno distanti (Figura 12). Dall'immagine risulta evidente come non ci sia una distribuzione omogenea delle differenze e in alcune zone queste risultano significative, nell'ordine di qualche centimetro. È inoltre interessante notare che spesso le differenze sono localizzate lungo le linee di scansione del sistema mobile, come se fossero più dovute al calcolo della traiettoria del sensore piuttosto che alla misura laser scanner. Ovviamente tali preliminari risultati richiedono una più approfondita verifica per poter effettivamente valutare i risultati. Come riportato nell'istogramma in figura 13, la maggior parte dei punti si trova a distanze inferiori ai 0.03 m, in particolare l'83% dei punti ha uno scostamento che risulta in linea con quanto già riscontrato in precedenti sperimentazioni (Tucci et al., 2018); la gran parte dei punti rimanenti risulta compresa tra i 0.03 m e 0.06 m.

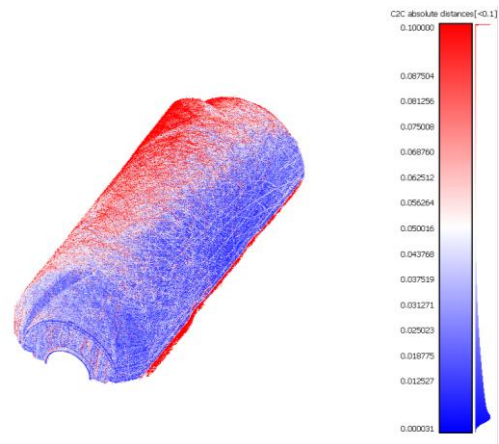


Figura 12. Analisi della deviazione superficiale *C2C distance* tra i dati del laser scanner statico e quelli basati su HMLS.

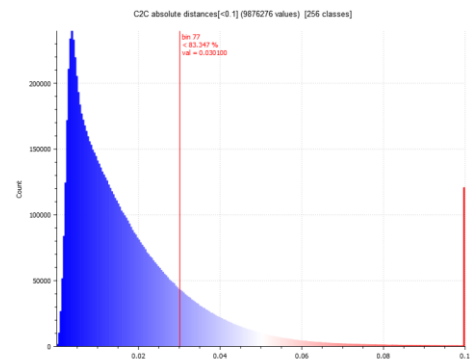


Figura 13. Iistogramma della deviazione superficiale *C2C distance*.

È importante tenere presente che le scansioni effettuate da HMLS con durate molto lunghe o che attraversano percorsi molto lunghi sono soggette a errori cumulativi maggiori che possono generare distorsioni significative nel posizionamento degli elementi nello spazio (Nocerino et al., 2017).

A supporto di tali analisi, sono state estrapolate due sezioni dalle nuvole di punti della volta, una longitudinale e una trasversale, di 0.02 m di larghezza, in cui si possono analizzare in maniera puntuale le differenze riscontrate.

Dalle due sezioni è possibile notare come non risultino evidenze degne di nota di eventuali disallineamenti tra i dati. Inoltre, facendo un controllo puntuale verificando la distanza tra i punti più prossimi delle due nuvole di punti si riscontrano valori perlopiù compresi tra i 5 e i 2 cm (Figura 14).

L'assenza di grandi deviazioni indica che i dati HMLS risultano congruenti dal punto di vista geometrico con quelli del rilievo statico.

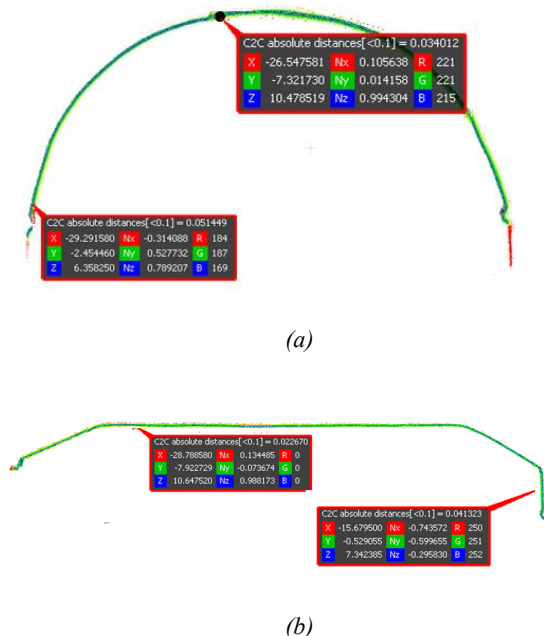


Figura 14. Distanza punto - punto: sezione longitudinale (a) e trasversale (b).

5. Conclusioni

La ricerca si è posta come obiettivo quello fare una prima valutazione di come e quando sia possibile porre alla base di un processo di modellazione architettonica, secondo un approccio Scan-to-BIM, una fonte dati proveniente da un rilievo laser scanner mobile. Tali metodi di rilievo hanno indubbi vantaggi in termini di efficienza dei tempi di acquisizione e gestione dei dati, ma potrebbero essere caratterizzati da una minore precisione rispetto ad un rilievo laser scanner statico.

Le principali differenze tra l'approccio *mobile* e statico riguardano la pianificazione dell'acquisizione, il tempo utilizzato per ottenere una nuvola di punti, le procedure di processamento. La verifica è stata attuata all'interno del caso studio considerato limitando però il processo di confronto unicamente alla navata centrale della chiesa.

Il confronto si è basato sulla stima di alcuni parametri ritenuti significativi per una prima valutazione, in particolare ci si è basati sul calcolo dei parametri di densità (*density*) e la "rugosità" (*roughness*). La modalità di acquisizione laser scanner in movimento, pur con reali vantaggi in termini di tempo, presenta però ancora dei limiti relativamente alla densità dei punti e alla "rugosità" della nuvola di punti. Questa situazione potrebbe creare difficoltà in successive fasi di modellazione soprattutto nella definizione dei dettagli architettonici (Sammartano et al., 2021).

Il confronto qualitativo mostra risultati coerenti con quanto già attestato in sperimentazioni precedenti. Alcuni aspetti richiedono però ulteriori ricerche e più approfondite prove per poter ricavare valutazioni più rigorose.

In questa prospettiva la ricerca si muove su ulteriori miglioramenti per potenziare questi sistemi di rilievo ormai sempre più vantaggiosi, con la possibilità di unificare dati acquisiti simultaneamente con differenti strumentazioni, in relazione al livello di dettaglio e di approfondimento da voler perseguire.

6. Contributi, conflitti di interessi e ringraziamenti

Gli autori hanno contribuito in maniera paritetica alla realizzazione del lavoro e alla stesura del testo. Gli autori dichiarano di non aver nessun conflitto di interessi.

Si ringrazia inoltre la ditta MicroGeo per aver fornito lo strumento GeoSLAM Zeb Horizon, in particolare Carmen Zaami per il supporto durante le fasi di rilievo e Francesco Battinelli per il supporto durante la prima fase di elaborazione dei dati GeoSLAM.

Bibliografia

Caruso E., Santa Maria della Grotta, Murex, Marsala, 1998

Casano Del Puglia R., 2012. Marsala, la Chiesa di Santa Maria della Grotta: tra ipogei punici e catacombe paleocristiane. Brigantino, il portale del Sud. http://www.ilportaledelsud.org/santa_maria_grotta.htm. (Accessed 31 August 2023)

Corrao R., Di Paola F., Termini D., Vinci C., 2021. Investigation of the underground building heritage and the mechanism of water flowing in Qanats in Palermo through innovative surveying techniques. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-M-1-2021, 147-154. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-m-1-2021-147-2021>.

Del Duca, G., Machado C., 2022. Assessing the Quality of the Leica BLK2GO Mobile Laser Scanner versus the Focus 3D S120 Static Terrestrial Laser Scanner for a Preliminary Study of Garden Digital Surveying. *Heritage*, 6, pp. 1007-1027. <https://doi.org/10.3390/heritage6020057>

Giglio R., 1997. Lilibeo Marsala. Nuove scoperte archeologiche nell'area di Santa Maria della Grotta e del Complesso dei Niccolini, *SicA*, XXX, 93-95, pp. 45-58.

Nocerino E., Menna F., Remondino, F. Toschi, I., Rodríguez-González P., 2017. Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. In F. Remondino & M. R. Shortis (Eds.), *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, edited, SPIE (p. 103320I). <https://doi.org/10.1117/12.2270761>

Hyypä E., Yu X., Kaartinen H., Hakala T., Kukko A., Vastaranta M., Hyypä J., 2020. Comparison of Backpack, Handheld, Under-Canopy UAV, and Above-Canopy UAV Laser Scanning for Field Reference Data Collection in Boreal Forests. *Remote Sens.*, 12, 3327. <https://doi.org/10.3390/rs12203327>

Aricò M., La Guardia M., Lo Brutto M., Rappa E.M., Vinci C., 2023. Mobile mapping for cultural heritage: the survey of the complex of St. John of the Hermits in Palermo (Italy). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1/W1-2023. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-25-2023>.

Otero R., Lagüela S., Garrido I., Arias P., 2020. Mobile indoor mapping technologies: A review. *Automation in Construction*, 120, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103399>.

Pocobelli, D.P., Boehm, J., Bryan, P. et al., 2018. BIM for heritage science: a review. *Heritage Science*, 6, 30 (2018).

Rocha, G.; Mateus, L.; Fernández, J.; Ferreira, V., 2020. *A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings*. *Heritage*, 3, 47-67.

Rocha G, Mateus L, Fernández J, Ferreira V., 2020. A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings. *Heritage*, 3, pp. 47-67. <https://doi.org/10.3390/heritage3010004>.

Sammartano G., Spanò A., 2018. Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content

validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. *Applied Geomatics*, 10(4), 317–339. <https://doi.org/10.1007/s12518-018-0221-7>

Sammartano G., Previtali M., Banfi F., 2021. Parametric generation in HBIM workflows for slam-based data: discussing expectations on suitability and accuracy. *Proceedings of the joint international event 9th ARQUEOLÓGICA 2.0 & 3rd GEORES, Valencia (Spain), 26–28 April 2021*. <https://doi.org/10.4995/Arqueologica9.2021.12155>.

Tucci G., Visintini D., Bonora V., Parisi E., 2018. Examination of Indoor Mobile Mapping Systems in a Diversified Internal/External Test Field. *Applied Sciences*, 8, 401. <https://doi.org/10.3390/app8030401>.