

CONFRONTO TRA DUE TECNOLOGIE PER IL RILIEVO 3D DEL PATRIMONIO COSTRUITO E DEI BENI CULTURALI

G. Fiorini ^{a,b}, M.A. Tini ^a, G. Bitelli ^a

^a DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italia, giulia.fiorini12@unibo.it, mariaalessandra.tini@unibo.it, gabriele.bitelli@unibo.it

^b Dipartimento di Scienze dell'Antichità, Sapienza Università di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Italia, giulia.fiorini@uniroma1.it

Parole chiave: Rilievo 3D, Patrimonio Edilizio, Beni Culturali, Rilievo Laser Scanning, Camera 3D, Nuvole di Punti

Keywords: 3D Survey, Building Heritage, Cultural Heritage, Laser Scanning Survey, 3D Camera, Point Clouds

Abstract

L'acquisizione di dati tridimensionali accurati degli spazi interni riveste un ruolo di significativa importanza in diversi campi, tra cui la gestione immobiliare, l'archeologia industriale e i Beni Culturali. Il complesso di Villa Maraffa, situato nei pressi di Ravenna (Italia), è stato utilizzato come caso di studio per l'utilizzo e il confronto di tecnologie e sensori moderni per la documentazione e il rilievo. L'acquisizione dei dati è avvenuta mediante l'impiego della camera 3D Matterport Pro2 e del laser scanner Leica RTC360. Il primo, sviluppato principalmente per la documentazione in ambito immobiliare, è stato scelto per l'economicità e la rapidità nell'acquisizione dei dati; l'altro sensore impiegato in questo studio è invece stato scelto proprio per l'elevata precisione che lo caratterizza, generando una nuvola di riferimento per il confronto. Il lavoro si focalizza sulla valutazione, che comprende valutazioni globali e specifiche, della qualità della nuvola di punti ottenuta dalla Matterport Pro2. La valutazione dei problemi, come la mancanza di dato e il disallineamento, è stata compiuta confrontando le due nuvole di punti acquisite. I risultati ottenuti sono quindi stati esaminati al fine di trovare una soluzione ottimale per un rilievo rapido e preciso, che consenta una ricostruzione digitale completa dell'oggetto.

Accurate three-dimensional (3D) data from indoor spaces holds significant importance in various fields like real estate management, industrial archaeology and Cultural Heritage. Villa Maraffa complex, located near Ravenna (Italy), served as a case study for employing and comparing advanced technology and sensors in surveying these contexts. To acquire data, the sensors used were Matterport Pro 2 and Leica RTC360. The first one, mainly developed for real estate surveys, has been chosen because of the efficiency and cost-effectiveness in generating point clouds, albeit with lower precision compared to the Leica RTC360 Laser Scanner, the other sensor employed in this study. The focus of the paper is on assessing the point cloud's quality, with an analysis of the Matterport data, including global and specific evaluations. Potential issues like incomplete data and misalignment are identified by comparing coordinates from the Leica scanner. The results are examined to find an optimal solution for a prompt, precise, and well-timed survey, enabling a complete digital reconstruction of the object.

1. Introduzione

La progettazione e il restauro architettonici, la conservazione del Patrimonio Culturale e la creazione di esperienze di realtà virtuale sono solo alcune delle applicazioni per cui l'acquisizione di dati tridimensionali è di fondamentale importanza. I manufatti storici, come ad esempio gli edifici, i ritrovamenti negli scavi archeologici e le sculture, sono caratterizzati da geometrie complesse che racchiudono al loro interno informazioni significative sull'evoluzione umana, oggetti che devono essere conservati e tramandati. Al fine di preservare questi beni, le rappresentazioni digitali di essi sono fondamentali, in quanto consentono che ne venga documentata l'esistenza, ma anche che vengano restaurati, riprodotti o ricostruiti digitalmente. I dati tridimensionali forniti dalle nuvole di punti, in questo ambito, stanno avendo sempre maggior successo, essendo uno strumento affidabile per raggiungere questi obiettivi (Bitelli et al., 2019). Questi sono fondamentali per la ricostruzione virtuale tridimensionale dei Beni Culturali, perché forniscono moltissime informazioni sia sulla geometria che sui colori e i materiali (Arapakopoulos et al., 2022).

Dall'inizio degli anni 2000 si è assistito a un notevole incremento dell'interesse verso l'utilizzo dei dati delle nuvole di

punti nel settore dei beni immobiliari e del Patrimonio Culturale; sia il mondo accademico che aziendale ne hanno studiato attentamente le potenzialità e possibilità (Bitelli et al., 2017).

I laser scanner terrestri (TLS) forniscono informazioni geometriche complete e precise, sono però degli strumenti molto costosi, che richiedono esperienza da parte dell'operatore per poter essere utilizzati al meglio, inoltre, alle volte, il tempo di acquisizione può risultare molto lungo (Selvaggi et al., 2018). Al contrario, i sistemi panoramici multicamera, veloci e meno precisi, sono stati pensati per essere utilizzati, anche da utenti non esperti, come strumenti di documentazione speditiva dello stato di fatto di un immobile (Campos et al., 2018).

Con l'avvento di fotocamere panoramiche di basso costo (Barazzetti et al., 2018), gli utenti possono acquisire un'immagine panoramica completa in un unico scatto, riducendo il numero di fotogrammi necessari per restituire un'ambiente (Ingman et al., 2020). Un sistema basato su questo principio di funzionamento è stato sviluppato da Matterport Inc. con l'obiettivo di operare soprattutto nel settore immobiliare. In precedenti ricerche sono state analizzate le potenzialità della camera Matterport Pro2, compreso il suo utilizzo per lo sviluppo di mondi virtuali interattivi e la determinazione dell'accuratezza dei dati (Shults et al., 2019), (Matterport,

2023a). Questo lavoro analizza le prestazioni della Matterport Pro2, in relazione al laser scanner Leica RTC360, utilizzando come caso studio Villa Maraffa a Piangipane di Russi (RA). L'obiettivo è andare oltre l'usuale utilizzo della Matterport Pro2 (nota: attualmente è disponibile il modello Pro3) e acquisire dati sia qualitativi che quantitativi, avendo come riferimento i dati ottenuti dallo strumento prodotto da Leica Geosystems. Quest'ultimo è infatti caratterizzato da prestazioni e valori dichiarati di precisione e accuratezza significativamente migliori rispetto alla camera Matterport Pro2.

Un focus iniziale è stato puntato sulle caratteristiche dei due strumenti, considerando anche le differenze nelle fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati. Il tema che è stato poi analizzato principalmente è il confronto tra le nuvole di punti ottenute, valutando la qualità metrica e geometrica di quella generata dalla Matterport Pro2 utilizzata come se fosse uno strumento di rilievo e analizzando la qualità del processo di autoallineamento. L'obiettivo è quello di stimare l'efficacia di questa tecnologia in contesti specifici, come la conservazione e il restauro dei Beni Culturali, e di condurre un'analisi comparativa tra questi due strumenti, considerandone vantaggi, svantaggi e limiti.

Villa Maraffa è stata scelta come caso studio in quanto la forma semplice e l'articolata distribuzione interna degli ambienti del complesso edilizio la rendono perfetta per testare le capacità di raccolta dati e l'allineamento delle nuvole di punti. Inoltre, trattandosi di una casa di campagna del XIX secolo, può essere considerata un caso esemplare sia nell'ambito dei Beni Culturali che di Archeologia Industriale.

2. Caso studio: Villa maraffa



Figura 1. Immagine storica di Villa Maraffa, in Cortina di Russi e la sua storia, in "In Rumàgna", 1981/82, p.106.

Il complesso di Villa Maraffa (Fig. 1), situato nei pressi di Ravenna (Italia), è costituito da una villa storica, un lavatoio e una casa colonica, il cui nome deriva dal cognome dei proprietari ottocenteschi, i "Maraffi" (Ediltecnica, 2023). Per risalire agli sviluppi e ai cambiamenti storici che hanno interessato la villa e le strutture circostanti, è necessario esaminare i nomi dei proprietari e le modifiche da loro apportate a questo edificio, che si ritiene abbia origine nel XVIII secolo (Fabbi, 2007). Questa ricerca può essere condotta attraverso i documenti di censimento e altre fonti di informazione. Purtroppo, gli archivi di Ravenna non contengono mappe o registri relativi ai possedimenti e ai proprietari fino al 1835, anno a cui risalgono le prime informazioni certe, quando la Villa fu citata in una dichiarazione censuaria sotto la proprietà dello stesso Pasquale Maraffi (Fabbi, 2007). Nell'arco di quasi un secolo la villa passò nelle mani di numerosi proprietari e variò destinazione d'uso, con conseguenti modifiche sia nella

forma che nella struttura interna dell'edificio. Dopo essere stata di proprietà dell'orfanotrofio femminile Galletti-Abbiosi fino al 1974, la villa fu abbandonata (Fabbi, 2007).

La villa è attualmente in fase di restauro, a seguito del quale subirà un'ulteriore variazione di destinazione d'uso. La ricostruzione, basata sul progetto di restauro degli Operai dell'Arte, mira a rinnovare e sostituire la struttura esistente, pur mantenendo gli aspetti storici del XVIII secolo. Ciò comporta l'adattamento dell'edificio all'ambiente rurale circostante e la riprogettazione degli spazi interni per soddisfare le esigenze dell'istituzione.

3. Acquisizione dei dati

3.1 Matterport Pro2

La camera 3D Matterport Pro 2 è un dispositivo completamente automatico che registra il mondo in tre dimensioni, utilizzando i chip PrimeSense (Khoshelham e Elberink, 2012). Come già detto da Pulcrano et al. nel 2019, il sistema si basa su un'implementazione della tecnologia SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) basata sulle immagini. Per raccogliere le informazioni necessarie a produrre una rappresentazione 3D dei luoghi interni, la Matterport Pro2 è costituito da un sistema di tre fotocamere, un sensore a infrarossi e un motore che lo fa ruotare di 360 gradi. Il sensore a infrarossi acquisisce dati relativamente alla profondità e consente di riprodurre un luogo nello spazio 3D, mentre le tre fotocamere vengono utilizzate per scattare le fotografie, acquisendo così il dato colorimetrico della geometria acquisita.

Il range di acquisizione varia tra un minimo di 1 m e un massimo compreso tra i 4 e i 5 m, in base all'illuminazione ambientale e alla geometria dell'oggetto da rilevare. Questo ridotto range di acquisizione può essere un problema in quelle situazioni in cui, ad esempio, non è possibile avvicinarsi all'oggetto o quando l'oggetto da acquisire è caratterizzato dalla presenza di spazi ampi. A causa di questa limitazione, i dati devono essere raccolti da numerosi punti di scansione e ciò non è sempre sufficiente, come nel caso in cui si trovi in ambienti molto ampi (Gärdin e Jimenez, 2018).

Il campo visivo di questo strumento è di 360 gradi in orizzontale e 300 gradi in verticale; ciò è evidenziato dalla presenza di due coni d'ombra, uno sopra e uno sotto il punto di acquisizione, nella nuvola di punti. Il primo di questi coni d'ombra può essere fonte problematica quando si acquisiscono soffitti caratterizzati dalla presenza, ad esempio, di travi a vista che creano ulteriori zone d'ombra e rendono più difficile ottenere un dato completo nonostante l'acquisizione da diversi punti di stazione. L'acquisizione di una scansione richiede tra i 25 e i 30 secondi per essere completata, compresi i tempi di acquisizione della camera, il trasferimento dei dati al dispositivo mobile (smartphone o tablet) e un primo allineamento automatico grezzo dei dati acquisiti (Matterport, 2023b). La complessità della geometria e la quantità di scansioni hanno un impatto sul tempo di elaborazione. Dopo che le scansioni sono state trasferite al dispositivo portatile, il programma 3D Capture le unisce automaticamente tra loro. Come già detto, si tratta di un primo allineamento grezzo che verrà migliorato nella fase di post-elaborazione. Cortex, il motore di ricostruzione brevettato da Matterport, esegue quindi le operazioni di allineamento automatizzato delle nuvole e ricostruzione tridimensionale della geometria entro poche ore dal caricamento del progetto sul server cloud. Grazie alla natura online dell'elaborazione dei dati di Matterport, l'intero processo è automatizzato e non richiede l'intervento dell'utente. Il modello 3D che viene restituito dagli algoritmi automatici di calcolo di Matterport combina al suo interno immagini ad alta gamma dinamica (HDR) con il

modello geometrico (Lehtola et al., 2017). Per l'utente è quindi possibile, a poche ore di distanza dall'acquisizione, effettuare tour virtuali degli edifici rilevati utilizzando il plug-in multimediale Unity. Questo insieme di funzionalità rapide e automatiche rende la Matterport Pro2 particolarmente utile e adatta al settore immobiliare. Oltre alle nuvole di punti, è possibile scaricare dal cloud il modello 3D (in formato OBJ) degli ambienti rilevati, così da poterli utilizzare in applicazioni di realtà virtuale (Lehtola et al., 2017).

L'accuratezza dichiarata dall'azienda per le misure effettuate è pari all'1% della distanza tra lo strumento e il punto acquisito in condizioni ottimali; ciò si traduce in un'approssimazione di 0,05 m per un punto acquisito alla distanza massima di 5 m (Matterport, 2023c). Tuttavia, fattori come la luminosità, la geometria e altre variabili possono influire sull'accuratezza delle misure.



Figura 2. Rilievo con Matterport Pro2.

Sebbene la camera Matterport Pro2 sia stata utilizzata con successo in ambienti esterni (Gärden e Jimenez, 2018), (Popescu et al., 2019), l'interferenza della luce solare con le lunghezze d'onda utilizzate dalla camera a infrarossi può influire sulla raccolta dei dati 3D e sull'allineamento tra le varie scansioni (Matterport, 2023b). Inoltre, ricerche precedenti hanno dimostrato che, rispetto ai scanner laser, la camera 3D Matterport Pro2 ha una precisione limitata nella modellazione degli spazi interni e produce una nuvola di punti irregolare che dipende dalla tecnica specifica utilizzata per generarla (Pulcrano et al., 2019), (Lehtola et al., 2017). Inoltre, la sua applicabilità è limitata dal raggio d'azione limitato, anche se l'acquisizione rapida dei dati e l'elaborazione automatizzata aiutano a superare queste carenze, soprattutto per gli utenti non esperti (Ingman et al., 2020).

Il rilievo di Villa Maraffa utilizzando la camera Matterport Pro2 è stato eseguito a partire dal centro dell'edificio, in corrispondenza dell'accesso principale (Fig. 2) e proseguendo poi verso le altre stanze, fino a completare l'acquisizione dell'intero edificio. Per completare quest'operazione e ottenere un dato che fosse il più completo possibile è stato necessario eseguire 94 scansioni in posizioni diverse. Considerando il tempo di acquisizione di ogni scansione, il tempo necessario per spostare e posizionare la strumentazione e la prima fase di elaborazione dei dati richiesta, come l'identificazione di porte e finestre, la durata totale del rilievo è stata di circa 5 ore. Al termine di queste, i dati sono stati caricati sulla piattaforma online per la post-elaborazione automatica.

3.2 Leica RTC360

In questo studio, la nuvola di punti di riferimento è stata ottenuta utilizzando il laser scanner terrestre a tempo di volo Leica RTC360 (Ingman et al., 2020), (Ogawa e Hori, 2019). Si tratta di uno strumento adatto a produrre una nuvola di punti di riferimento, viene infatti dichiarata dal produttore una precisione di 2,9 mm a 20 m, con una velocità di raccolta dati di due milioni di punti al secondo e una portata di 130 m (Leica Geosystems, 2023). Per l'elaborare dei dati acquisiti è stato utilizzato il software Leica Cyclone Register360 che ha consentito di unire le nuvole sfruttando gli algoritmi di computo automatico della corrispondenza tra nuvole, in quanto non sono stati utilizzati target durante l'acquisizione.



Figura 3. Rilievo con Leica RTC360.

Il rilievo con RTC360 è iniziato dallo stesso punto del rilievo con la camera Matterport Pro2 (Fig. 3). Prima di iniziare il rilievo, abbiamo impostato i parametri di scansione al valore minimo in termini di densità di punti, in modo che fossero realisticamente comparabili con i risultati forniti da Matterport. Durante tutto il processo di acquisizione, l'allineamento grezzo delle scansioni è stato controllato e migliorato manualmente sull'iPad utilizzando l'applicazione Leica Cyclone Field360. La nuvola di punti complessiva è stata ottenuta acquisendo dati da 24 punti di scansione; il processo di rilievo ha richiesto circa 2 ore di tempo. Dopo aver terminato il rilievo con RTC360, è iniziata la fase ottimizzazione dell'allineamento e di verifica dei risultati. Abbiamo iniziato migliorando l'allineamento e i collegamenti tra le scansioni, verificando la sovrapposizione tra esse sia in pianta che in sezione con il programma Leica Cyclone Register360. Durante questo processo si sono verificati la correttezza e la rigidezza dei collegamenti e il grado di sovrapposizione tra le scansioni, in modo da poter implementare i collegamenti così da ottenere dati conformi ai requisiti in termini di precisione e accuratezza. A differenza dei dati ottenuti dalla camera Matterport Pro2, dove non sono disponibili informazioni sull'allineamento delle varie scansioni, abbiamo potuto esaminare la qualità complessiva della nuvola di punti globale ottenuta dopo aver concluso l'elaborazione in post-processing con il laser scanner RTC360. Questa è risultata caratterizzata da 30 connessioni caratterizzate da una rigidezza e sovrapposizione medie totali rispettivamente dell'82% e del 53%. L'errore medio finale sulle connessioni tra le nuvole di punti che si è ottenuto è pari a 0,002 m. Si tratta di un risultato appropriato perché sia la qualità dei dati metrici acquisiti sia la qualità del processo di allineamento hanno raggiunto un grado di precisione molto elevato, superiore a quello richiesto per le scale di rappresentazione comunemente utilizzate in architettura.

4. Analisi dei dati

4.1 Confronto tra le nuvole di punti complete considerando l'autoallineamento dei dati Matterport

Per confrontare le due nuvole di punti globali acquisite dagli scanner laser Matterport e RTC360 è stato utilizzato il software open source CloudCompare. Il primo passo è stato l'allineamento della nuvola di punti ottenuta tramite la Matterport nel sistema di riferimento della nuvola di punti ottenuta da RTC360. Si è successivamente utilizzato l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP) per migliorare l'allineamento fatto manualmente. Si sono quindi analizzate le distanze tra le nuvole utilizzando l'algoritmo di calcolo della distanza chiamato "nearest neighbour distance". In questa prima analisi, è stato utilizzato un intervallo di distanza compreso tra 0 m e 0,65 m, che era stato precedentemente identificato come il valore reale della distanza massima tra la rappresentazione di pareti e soffitti nelle due nuvole di punti.

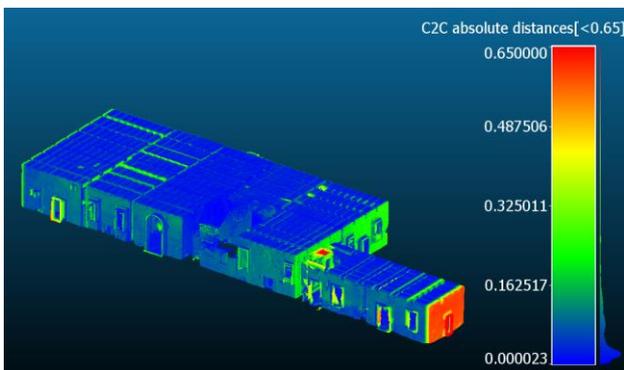


Figura 4. Analisi della distanza tra le due nuvole di punti iniziando il confronto dall'ingresso principale.

Nella Figura 4 sono rappresentate le distanze tra le due nuvole di punti: in rosso sono indicate le distanze maggiori e in blu quelle minori. Grazie a questa prima analisi, abbiamo potuto osservare che le pareti verticali che corrono trasversalmente allo sviluppo principale dell'edificio, sono caratterizzate dai valori di distanza maggiori. Quest'analisi ha rivelato come la distanza tra le due nuvole, in particolare nelle pareti, aumenti man mano che ci si allontana dal punto in cui le due nuvole sono state reciprocamente orientate. Questo ci ha spinto a considerare la possibilità che vi siano problemi dovuti all'allineamento automatico delle singole nuvole da parte di Matterport.

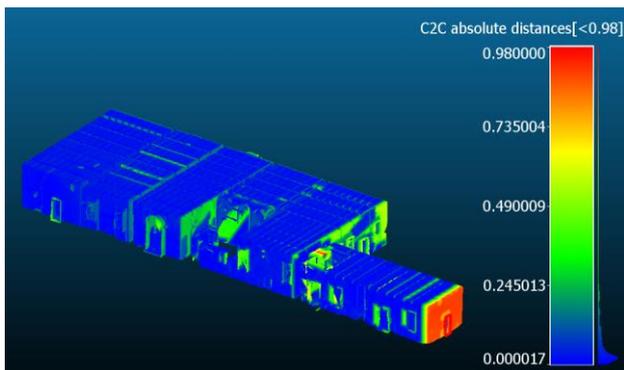


Figura 5. Analisi della distanza tra le due nuvole di punti iniziando il confronto dall'angolo in basso a sinistra.

Per questo motivo, e per tenere conto della potenziale propagazione dell'errore dovuta all'allineamento delle nuvole di

punti dei dati Matterport, abbiamo deciso di effettuare le stesse analisi partendo dall'allineamento delle due nuvole da un bordo. In questo caso, la distanza massima tra nuvole è di 0,98 metri. La Figura 5 mostra che le distanze tra le pareti in prossimità della parte più stretta dell'edificio sono maggiori. In particolare, la distanza tra le pareti in questa sezione dell'edificio è compresa tra 0,70 m e 0,98 m.

Questo risultato suggerisce che la tendenza delle differenze aumenta in relazione alla distanza dal punto di allineamento.

4.2 Confronto tra nuvole di punti singoli

Dopo aver confrontato le nuvole di punti riferite all'intera struttura e aver osservato la distribuzione delle distanze, si è deciso di esaminare le singole nuvole di punti. Questo tipo di analisi ci avrebbe permesso di determinare se le sostanziali discrepanze nelle nuvole complessive fossero causate da problemi nell'acquisizione dati della camera Matterport Pro2 o dalla procedura di allineamento automatico, sulla quale non è possibile avere alcun tipo di informazione.

Per questa analisi, è stato necessario identificare una stanza che potesse essere acquisita in una singola scansione, tenendo presente la distanza massima di acquisizione della camera Matterport. Dopo aver considerato i dati forniti dal produttore, le condizioni di acquisizione e l'analisi della nuvola di punti, si è stabilito che 4,5 m sarebbe stato il raggio di acquisizione massimo per questo caso di studio, in quanto le condizioni di illuminazione non sono ottimali e la geometria delle pareti non è uniforme. Dopo aver identificato la stanza e aver acquisito i dati, per prima cosa le due nuvole di punti sono state orientate nello stesso sistema di riferimento, sono quindi stati rimossi i punti che non facevano parte della stanza per evitare di includerli nel computo della distanza.

Da una prima analisi l'intervallo di distanza assoluta nuvola-nuvola è risultato compreso tra 0 m e 1,947 m. Lo studio di questi dati e l'ottimizzazione dei risultati ottenuti da questo confronto ha rivelato che la distanza tra le nuvole della stanza acquisite con i due strumenti raggiunge un valore massimo di 0,080 m, mentre i valori di distanza maggiori si riferiscono alle diverse zone d'ombra sotto i due strumenti o agli oggetti che si sono spostati tra le due scansioni.

Gauss: mean = 0.043789 / std.dev. = 0.062744 [2080 classes]

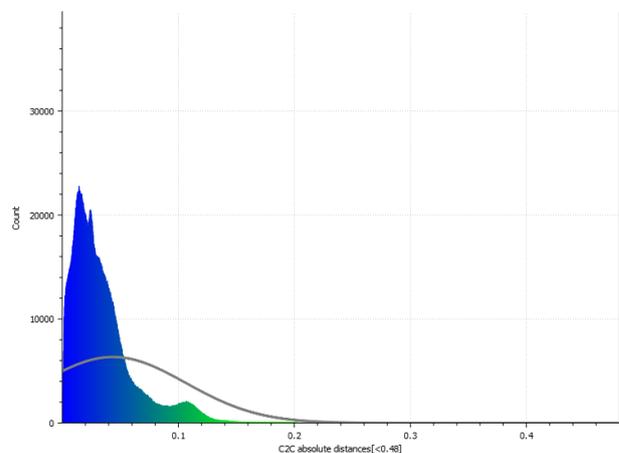


Figura 6. Istogramma che mostra la distribuzione delle distanze nel confronto delle singole nuvole.

Per evidenziare e determinare al meglio il valore medio della distanza tra le due nuvole, questa è stata ricalcolata limitando la distanza massima agli errori eliminabili. Di conseguenza, la distanza media tra le due nuvole è stata calcolata pari a 0,044 m

(Fig. 6). Considerando che i lati della stanza sono lunghi rispettivamente 5 m e 7 m, il risultato ottenuto è coerente con quanto riportato dal produttore.

Analizzando una sola scansione per strumento, è stato inoltre possibile effettuare una rapida analisi del numero di punti acquisiti.

	RTC360	Matterport Pro2
Nuvola di punti intera	10.058.840	4.533.554
Nuvola di punti segmentata	9.552.633	4.404.387
Punti eliminati	506.207	129.167

Tabella 1. Numero di punti nelle due nuvole di punti.

Come si evince dalla Tabella 1, e come era possibile immaginare considerando le caratteristiche tecniche dei due strumenti, la quantità di punti acquisiti da RTC360 è più del doppio di quella acquisita da Matterport Pro2. Inoltre, valutando i punti eliminati perché non appartenenti alla stanza, si nota una differenza ancora maggiore dovuta alla diversità dei campi di acquisizione dei due strumenti.

4.3 Confronto tra nuvole di punti intere allineando manualmente tutte le singole nuvole acquisite da Matterport

Dopo aver analizzato i risultati del confronto tra le singole nuvole di punti, si è deciso di proseguire la ricerca eseguendo un nuovo confronto tra le due nuvole di punti intere, allineando però manualmente le singole nuvole acquisite dalla camera Matterport Pro2 tra loro. In primo luogo, tutte le nuvole di punti sono state segmentate eliminando tutti i punti acquisiti a una distanza superiore a 4,5 metri dal punto di stazione. Di conseguenza, sono stati eliminati tutti i punti con un grado di imprecisione intrinseca considerato troppo elevato.

Dopo il completamento della fase di segmentazione, si è passati all'allineamento, iniziando dalla prima nuvola di punti acquisita e procedendo nell'ordine di acquisizione. Già durante questa fase si sono potute notare differenze significative tra la posizione delle singole nuvole di punti determinata automaticamente dall'algoritmo di allineamento di Matterport e quella assegnata da noi. Inoltre, nonostante alcuni punti di stazione fossero stati realizzati proprio in corrispondenza delle aperture tra le varie stanze, la differenza nella posizione delle nuvole è risultata particolarmente significativa proprio in corrispondenza di questi punti. Una volta allineate manualmente tutte le 94 scansioni acquisite con la camera Matterport Pro2, la nuvola complessiva così ottenuta è stata confrontata con quella ottenuta dalla fusione delle scansioni effettuate con il laser scanner Leica RTC360. Prima di confrontare le due nuvole è stato utilizzato l'algoritmo ICP per migliorare l'allineamento.

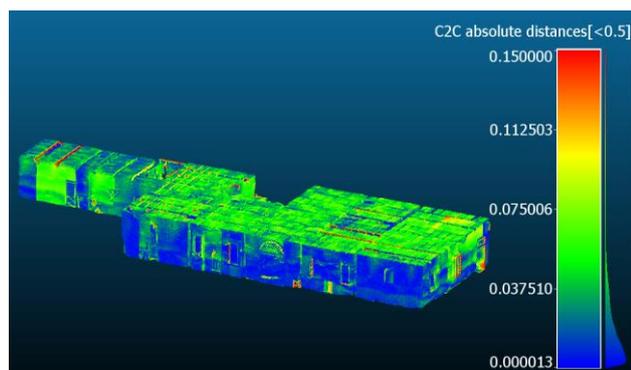


Figura 7. Analisi della distanza tra le due nuvole di punti allineamento manuale delle scansioni Matterport.

Dopo aver esaminato i risultati preliminari dello studio sulle distanze che il software calcola automaticamente in base alle informazioni disponibili, si è deciso di confrontare le distanze restringendo l'intervallo in modo da eliminare dal calcolo tutti i valori che non rappresentavano la distanza tra le due nuvole di punti rappresentati la geometria dell'edificio. Analizzando quindi i risultati nell'intervallo che è stato determinato come ottimale, compreso tra 0 m e 0,15 m, è stato possibile studiare più chiaramente le differenze tra le due nuvole (Fig. 7). Quest'analisi ha rivelato una distanza media di 0,022 m. Osservando i dati in falsi colori, è evidente che le parti verdi, che rappresentano distanze comprese tra 0,03 m e 0,07 m, si concentrano nella parte raffigurante il soffitto. Questo perché, nonostante siano state eseguite numerose scansioni all'interno di ogni stanza, avvicinandosi sempre a pareti diverse durante l'acquisizione, la distanza tra lo strumento e il soffitto è rimasta invariata e probabilmente maggiore rispetto alle parti dell'edificio. Ci sono anche alcune aree sul soffitto che evidenziano una distanza ancora maggiore tra le due nuvole; osservando questi dati si può notare che si tratta di regioni che sono state acquisite durante il rilievo con l'RTC360, ma non con il sistema Matterport perché erano coperte dal cono d'ombra proiettato dalle travi.

5. Risultati

Sulla base dei confronti effettuati in questo studio, è possibile concludere che la camera Matterport Pro2 è adatta per compiere rilievi di stanze o piccoli edifici dalla geometria semplice. Inoltre, risulta essere uno strumento molto utile per la documentazione rapida delle fasi di cantiere o per attestare le modifiche durante il lavoro, quando raggiungere un livello di accuratezza elevato non è fondamentale. Si tratta di uno strumento economicamente molto vantaggioso, di facile utilizzo e rapido nell'acquisizione. Tuttavia, la velocità di Matterport Pro2 dipende dalle dimensioni e dalla geometria degli oggetti perché, a differenza di RTC360, che ha un intervallo di distanza compreso tra 0,5 e 130 metri, Matterport esegue il rilievo in un intervallo di distanza compreso tra 1 e 5 metri in condizioni ottimali; quindi, per una stanza di grandi dimensioni sono necessari più punti di stazione, ciò aumenta notevolmente il tempo di acquisizione. Di conseguenza, non è possibile dire quale sia dei due strumenti sia in assoluto più veloce, poiché questo aspetto è strettamente dipende da altri parametri quali ad esempio le dimensioni e le condizioni di illuminazione dell'oggetto da acquisire. Matterport Pro2 presenta inoltre alcune limitazioni che possono influenzare la scelta dell'utente. In primo luogo, Matterport può eseguire rilievi solamente al chiuso in quanto si basa su un sistema a proiezione di luce infrarossa che è fortemente influenzato dall'interazione con altre sorgenti luminose, mentre RTC360 è adatto a eseguire rilievi sia all'interno che all'esterno. In secondo luogo, essendo stato concepito come strumento per la documentazione immobiliare, quindi più orientato alla creazione di tour virtuali basati su immagini panoramiche, non è uno strumento progettato per generare una nuvola di punti densa; questo è particolarmente evidente nei soffitti, poiché non è possibile avvicinarsi facilmente ad essi per acquisire dati da punti di stazione ad altezze diverse da quella del pavimento. Questa difficoltà nell'acquisizione di dati completi non lo rende uno strumento appropriato per rilievi dettagliati di edifici storici dove molto spesso i soffitti hanno geometrie complesse, come cassettoni, archi e volte. Un'altra limitazione di questo strumento è l'impossibilità per gli utenti di elaborare i dati grezzi originali acquisiti o avere informazioni in merito, in quanto il risultato dell'allineamento, dopo aver caricato le scansioni sul servizio cloud di Matterport, viene reso disponibile dopo circa 24 ore dal

caricamento Matterport 3D Showcase, mentre RTC360 consente agli utenti di allineare le nuvole di punti e di valutare le sovrapposizioni, la rigidità dei legami e le distanze da nuvola a nuvola usando il software Leica Cyclone Register360. L'ultima limitazione è che la camera Matterport Pro2 non consente di rimuovere automaticamente gli oggetti mobili, mentre tra i settaggi proposti da Leica vi è questa possibilità. Come già accennato, il software che accompagna l'RTC360 consente l'esplorazione immediata del modello tridimensionale acquisito e la possibilità di allineare le varie nuvole in tempo reale. Queste caratteristiche, che consentono di verificare i dati acquisiti già in fase di campagna, unite alla possibilità di controllare con estrema precisione le successive fasi di post-processing e alle caratteristiche di acquisizione proprie dello strumento in termini di precisione e accuratezza, ne fanno uno strumento ideale per il rilievo nel campo dei Beni Culturali. D'altra parte, la differenza di costo dei due strumenti è molto elevata e giustifica anche i diversi target in termini di utenti e applicazioni.

6. Conclusioni

L'acquisizione di nuvole di punti complete delle aree interne degli edifici, in particolare di quelli storici, è una questione molto complessa, che richiede un'attenta fase di studio e pianificazione preliminare del rilievo e tempi di acquisizione molto lunghi poiché è necessario acquisire dati da molti punti di scansione. In questo processo, la possibilità di vedere sul campo un'anteprima di quanto acquisito, come offerto dal software che accompagna i due strumenti utilizzati per questa ricerca, permette di ottimizzare i tempi di acquisizione adattando la posizione delle scansioni successive alle aree in cui le informazioni non sono ancora state acquisite. Sulla base di quanto mostrato da questa ricerca, Matterport Pro2 e RTC360 forniscono un diverso livello di precisione e accuratezza delle nuvole di punti acquisite; quindi, la scelta dello strumento deve essere dettata dallo scopo del rilievo, valutando la qualità metrica della nuvola di punti e il numero di scansioni da effettuare, quindi il tempo di acquisizione. Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda la possibilità per l'utente di avere un controllo diretto e oggettivo sulla post-elaborazione e sulla qualità dei dati. Questo è un elemento che per alcuni utenti è di fondamentale importanza, mentre per altri utenti un processo chiuso, eseguito automaticamente senza la necessità di lavoro e controllo da parte di un operatore esperto, è una soluzione ottimale, soprattutto se la qualità di questo processo è garantita. L'insieme di queste considerazioni porta a evidenziare come Matterport Pro2 (è ora disponibile il nuovo modello Pro3) si riveli uno strumento prezioso nel settore immobiliare e nella documentazione speditiva delle diverse fasi di lavoro in un cantiere, mentre per eseguire rilievi precisi e accurati è meglio affidarsi a laser scanner da rilievo professionali, come RTC360.

7. Contributi, conflitti di interessi e ringraziamenti

Contributi dei singoli autori

Idea e concezione, G.B. e M.A.T.; metodologia, G.F., M.A.T. e G.B.; software, G.F.; validazione, G.B. e M.A.T.; analisi, G.F.; revisione, G.B. e M.A.T.; supervisione, G.B. Tutti gli autori hanno letto e sono in accordo con quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

Conflitti di interessi: Tutti gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse da riportare.

Ringraziamenti

Ringraziamo Anita Yousefi, che ha collaborato con noi durante le fasi di acquisizione ed elaborazione dei dati nell'ambito della sua tesi di laurea magistrale. Ringraziamo inoltre l'associazione Operai dell'Arte APS per aver collaborato con noi durante l'acquisizione dati con la camera Matterport Pro2 e aver supportato la ricerca storica sul caso studio.

Bibliografia

- Arapakopoulos, A., Liaskos, O., Mitsigkola, S., Papatzanakis, G., Peppas, S., Remoundos, G., Ginnis, A., Papadopoulos, C., Mazis, D., Tsilikidis, O. & Yighourtakis, Y., 2022, 3D Reconstruction & Modeling of the Traditional Greek Trechadiri: "Aghia Varvara", *Heritage*, 5(2), pp. 1295–1309.
- Barazzetti, L., Previtali, M. & Roncoroni, F., 2018, Can we use low-cost 360 degree cameras to create accurate 3d models?, *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, pp. 69–75.
- Bitelli, G., Dellapasqua, M., Girelli, V. A., Sanchini, E., and Tini, M. A., 2017, 3D geomatics techniques for an integrated approach to Cultural Heritage knowledge: the case of San Michele in Acerboli's church in Santarcangelo di Romagna, *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, XLII-5/W1, pp. 291–296.
- Bitelli, G., Balletti, C., Brumana, R., Barazzetti, L., D'Urso, M. G., Rinaudo, F., and Tucci, G., 2019, The GAMHer research project for metric documentation of Cultural Heritage: current developments, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, pp. 239–246.
- Campos, M.B., Tommaselli, A.M.G., Honkavaara, E., Prol, F.D.S., Kaartinen, H., Issaoui, A. El & Hakala, T., 2018, A Backpack-Mounted Omnidirectional Camera with Off-the-Shelf Navigation Sensors for Mobile Terrestrial Mapping: Development and Forest Application, *Sensors*, 18(3).
- Fabbi, F., 2007, *Villa 'La Maraffa' Vicende storico-architettoniche*, 5.
- Gärden, D. & Jimenez, A., 2018, *Optical methods for 3D-reconstruction of railway bridges Infrared scanning, Close range photogrammetry and Terrestrial laser scanning* – PhD thesis, University of Technology, Luleå.
- Leica Geosystems, 2023, <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>, (Accessed 16 June 2023).
- Matterport, 2023a, <https://matterport.com/blog/introducing-pro2-3d-camera-my-all-one-marketing-solution>, (Accessed 16 June 2023).
- Matterport, 2023b, https://support.matterport.com/s/article/How-Sunlight-Affects-MatterportScans?language=en_US&ardId=kA05d000001DX1g, (16 Giugno 2023).
- Matterport, 2023c, https://support.matterport.com/s/article/Scanning-a-Job-Site-for-Construction-Documentation?language=en_US&ardId=kA05d000001DWyY, (Accessed 16 June 2023).
- Ediltecnica, 2023, <https://www.ediltecnica.com/project/villamaraffa/>, (Accessed 16 June 2023).
- Ingman, M., Virtanen, J.-P., Vaaja, M.T. & Hyyppä, H., 2020, A Comparison of Low-Cost Sensor Systems in Automatic Cloud-Based Indoor 3D Modeling, *Remote Sensing*, 12(16).

Khoshelham, K. & Elberink, S.O., 2012, Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications, *Sensors*, 12(2), pp. 1437–1454.

Lehtola, V. V., Kaartinen, H., Nüchter, A., Kajaluoto, R., Kukko, A., Litkey, P., Honkavaara, E., Rosnell, T., Vaaja, M.T., Virtanen, J.-P., Kurkela, M., Issaoui, A. El, Zhu, L., Jaakkola, A. & Hyyppä, J., 2017, Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods, *Remote Sensing*, 9(8).

Ogawa, T. & Hori, Y., 2019, Comparison with accuracy of terrestrial laser scanner by using point cloud aligned with shape matching and best fitting methods, *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9, pp. 535–541.

Popescu, C., Täljsten, B., Blanksvärd, T. & Elfgrén, L., 2019, 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods, *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(7), pp. 912–924.

Pulcrano, M., Scandurra, S., Minin, G. & Luggo, A. di, 2019, 3d cameras acquisitions for the documentation of Cultural

Heritage, *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W9, pp. 639–646.

Selvaggi, I., Dellapasqua, M., Franci, F., Spangher, A., Visintini, D., and Bitelli, G., 2018, 3D comparison towards a comprehensive analysis of a building in Cultural Heritage, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, pp. 1061–1066.

Shults, R., Levin, E., Habibi, R., Shenoy, S., Honcheruk, O., Hart, T. & An, Z., 2019, CAPABILITY OF MATTERPORT 3D CAMERA FOR INDUSTRIAL ARCHAEOLOGY SITES INVENTORY, *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. and Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, pp. 1059–1064.

© 2021 by the authors. Open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)

© 2021 degli autori. Pubblicazione open access come da termini e condizioni della licenza Creative Commons Attribution License Share Alike 4.0 (CC-BY-SA)