

Applicazione e validazione nell'uso di un *mobile 3D scan* LiDAR

Francesco Di Stefano¹[0000-0002-0604-7163], Fabio Piccinini¹[0000-0002-8593-4851],
Awal Rahali¹[0000-0001-5518-8520], Roberto Pierdicca¹[0000-0002-9160-834X],
Eva Savina Malinverni¹[0000-0001-6582-2943]

¹ Università Politecnica delle Marche,
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura, 60100 Ancona, Italia
{f.distefano, f.piccinini, a.rahali}@pm.univpm.it;
{r.pierdicca, e.s.malinverni}@staff.univpm.it

Abstract. In campo geomatico il LiDAR rappresenta una tecnica di rilievo ormai consolidata. La tecnologia *mobile 3D scan* rientra nella categoria di scanner dinamici che, durante la fase di campagna, eseguono anche il processamento dei dati in tempo reale, rappresentando quindi una metodologia di rilievo *fast and agile*. Per questo contributo, è stato individuato come strumento MLS il KAARTA Stencil 2-16 e si è scelto di elaborare una rassegna di sue applicazioni. In base al diverso ambito applicativo si richiede di configurare i parametri del sistema, in quanto tengono conto della risoluzione della nuvola di punti che si andrà a generare. Sono stati eseguiti dei test in diversi tipi di ambiente *outdoor* e *indoor*. Tali test applicativi sono stati eseguiti a livello del suolo in modalità *hand-held*. In seguito alla fase di campagna, sono stati effettuati processi di analisi delle nuvole di punti tramite *software*, come ad esempio CloudCompare, che hanno permesso di fare osservazioni sulla performance di questa tecnica di rilievo geomatico. La precisione e l'accuratezza delle nuvole di punti sono state validate anche attraverso un confronto *Cloud to Cloud* con quelle generate da TLS o da fotogrammetria, quest'ultime usate come *ground truth*. A conclusione dei risultati ottenuti è emerso che tale tecnologia può rappresentare una valida alternativa che consente di eseguire rilievi in minor tempo e con un numero inferiore di personale richiesto. Non sono mancati fattori di criticità emersi dai dati di *output* del rilievo che hanno però permesso di approfondire l'uso corretto di tale tecnologia.

Parole chiave: LiDAR, Mobile 3D Scan Technology, KAARTA Stencil 2-16, test

1 Introduzione

In campo geomatico, il LiDAR (Light Detection And Ranging) rappresenta una tecnica di rilievo ormai consolidata. I dispositivi laser hanno subito un notevole sviluppo a partire da scanner a postazione fissa fino ad arrivare alle attuali nuove modalità di acquisizione in movimento [1]. La tecnologia *mobile 3D scan* rientra nella categoria di scanner dinamici che, durante la fase di campagna, eseguono anche il processamento dei dati in tempo reale, rappresentando quindi una metodologia di rilievo *fast and agile*

[2]. La compattezza e il peso leggero che caratterizzano questi dispositivi mobili conferiscono loro portabilità e flessibilità, tali da poter essere installati su qualsiasi piattaforma e usati in diversi ambienti di rilievo, in particolare su lunghi percorsi e in ambienti difficili da rilevare con laser scanner statici [3]. I principali domini di applicazione, in cui questi dispositivi laser mobili sono stati testati, vengono raggruppati in: ambiente costruito e urbano, patrimonio culturale e archeologia, monitoraggio ambientale, foreste e agricoltura.

Per questo contributo, è stato individuato come strumento MLS (Mobile Laser Scanner) il KAARTA Stencil 2-16 [4] e si è scelto di elaborare una rassegna di sue applicazioni nell'ambito di vari progetti eseguiti dal gruppo di ricerca GAP (Geomatics Applications and Processing) [5].

L'articolo è così strutturato: dopo una prima analisi dello stato dell'arte (sezione 2) sulla tecnologia *mobile 3D scan* LiDAR, viene introdotto il KAARTA Stencil 2-16 con una panoramica di caratteristiche tecniche dello strumento (sezione 3). Seguono i paragrafi (sezione 3.1) dedicati alla descrizione dei casi studio dove è stato testato questo laser scanner mobile. Vengono quindi discussi i risultati ottenuti (sezione 4) sulla base delle performance dello strumento, della modalità di esecuzione dei rilievi e delle eventuali criticità riscontrate. Infine le considerazioni finali sono state indicate nella sezione 5.

2 Stato dell'arte

Nella comunità di ricerca della geomatica c'è un crescente interesse verso l'adozione di quei metodi di rilievo che garantiscano modalità di acquisizione speditive e allo stesso tempo complete e che racchiudano anche particolari esigenze come: facilità d'uso, affidabilità, accuratezza, efficienza, costi ridotti, ridotto sforzo umano. È noto, infatti, che l'integrazione di dati eterogenei, provenienti da fonti diverse, è in qualche modo inevitabile nel caso di rilievi 3D complessi [6].

Con l'espressione Mobile Mapping System (MMS) si intende una piattaforma mobile che può essere aerea o terrestre, in cui sono incorporati sistemi di misurazione e sensori per l'acquisizione di dati metrici geograficamente referenziati. Quindi, un MMS è un'integrazione di tre componenti *hardware* principali: sensori ottici, sensori di navigazione/posizionamento e un'unità di controllo [7]. Questa tecnologia, se combinata con un'unità LiDAR, può essere indicata come Mobile Laser Scanner (MLS). Questo nuovo approccio tecnologico ha il grande vantaggio di essere efficiente in termini di tempo e costo rispetto agli altri metodi di indagine. In questo caso i laser scanner vengono installati su piattaforme mobili al fine di ottenere scansioni multiple. Si tratta di un ulteriore miglioramento della tecnologia che combina un sensore mobile con la stima della posizione per ottenere una registrazione continua e angoli di vista illimitati [8]. Per quanto riguarda la qualità dei dati ottenuti con i rilievi MLS, va ricordato che essa dipende dai dispositivi utilizzati ma normalmente raggiunge una precisione di scala centimetrica/decimetrica e una risoluzione che dipende dalla velocità di acquisizione dei dati e dalla distanza degli oggetti rilevati [9].

Negli ultimi decenni l'innovazione dei sistemi di navigazione ha spinto la comunità scientifica verso l'utilizzo di diversi tipi di sensori che sono ampiamente utilizzati nella comunità geomatica, come le tecnologie MLS, che permettono di acquisire l'ambiente circostante in modo rapido ed efficiente attraverso la localizzazione dei dati [10]. Gli strumenti MLS commerciali sono dotati di più sensori per il sistema di navigazione composto da GNSS (Global Navigation Satellite System) e IMU (Inertial Measurement Unit). Questi due componenti possono garantire il corretto posizionamento georeferenziato per i dati tridimensionali della scansione laser [11]. Un sistema IMU può misurare sia le accelerazioni lineari (accelerometro a tre assi) sia le velocità di rotazione (giroscopio a tre assi), che possono essere integrate numericamente per fornire la posizione tridimensionale e l'orientamento di un oggetto [12]. Il livello di accuratezza del sistema di navigazione GNSS/IMU è legato al buon rilevamento del segnale del GNSS, anche se composto da sensori *low-cost* [13]. Nel caso in cui non si esegue un rilievo con GNSS perché sprovvisti di strumentazione o in caso di ambienti *indoor*, l'accuratezza della posizione viene garantita dalle tecnologie SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) o dell'odometria visual-inerziale [14] che consentono di ridurre l'errore di localizzazione assieme all'unità IMU. Diversi studi hanno affermato che ogni scansione dovrebbe iniziare e finire in un punto fisso per garantire un ciclo chiuso e localizzare correttamente i dati raccolti nell'ambiente sconosciuto, registrando l'intera nuvola di punti ottenuta senza il segnale GNSS [9,15]. La combinazione tra il sistema di navigazione IMU e SLAM o odometria visual-inerziale ridurrà con successo la deriva della navigazione ogni volta che il segnale GNSS non è chiaro, o è assente, e fornirà informazioni di geolocalizzazione relativa [10].

3 Strumenti e metodi

Il seguente contributo si basa sull'analisi delle applicazioni del MLS KAARTA Stencil 2-16 (Fig. 1). Tale sistema di mobile 3D scan è autonomo e leggero, con un piccolo computer integrato, caratteristiche che rendono lo strumento facilmente maneggevole e adatto a qualsiasi piattaforma di appoggio. Con l'ausilio di porte USB e HDMI, di cui lo Stencil 2 è provvisto, è possibile collegarlo con altri dispositivi come, ad esempio, uno schermo portatile che consente di monitorare lo stato di avanzamento del rilievo. Il sistema è dotato di un'unità laser Velodyne VLP-16 che, con un fascio di 16 raggi laser ed un campo visivo di tipo "ibrido" ($360^{\circ} \times 30^{\circ}$), raggiunge fino a 100 metri di range operativo ed acquisisce fino a 300.000 punti al secondo con un'accuratezza di ± 30 mm. Lo strumento non nasce con un sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) integrato ma, essendo dotato di IMU (Inertial Measurement Unit) con sistema microelettromeccanico (MEMS) [16], la scansione viene geolocalizzata in tempo reale in un sistema di riferimento locale, così come avviene similmente nella tecnologia SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) grazie alla tecnica del *loop-closure*. Il dispositivo mobile è inoltre incorporato con un *features tracker* che registra il percorso effettuato e permette l'acquisizione di immagini a risoluzione molto bassa per tutte le varie tipologie di ambienti in cui si opera. Il vantaggio principale di questo

strumento è l'uso di un nuovo algoritmo di odometria visual-inerziale [17]. Nella Tabella 1 si riassumono le principali caratteristiche tecniche del KAARTA Stencil 2-16 introdotte nel seguente paragrafo.

Tabella 1. Specifiche tecniche del KAARTA Stencil 2-16

LiDAR	Unità laser	Velodyne VPL-16
	Modalità di acquisizione	Tempo di volo
	Range	1 m [min] – 100 m [max]
	Campo visivo	360° x 30°
	Accuratezza	± 30 mm
	Velocità	300.000 punti/sec
Features Tracker	Risoluzione	640 x 360
	Frequenza	50 Hz
	Colore immagine	bianco-nero
Computer	Processore	Intel NUC 7i7 Quad Core
	Sistema operativo	Ubuntu Linux
	Memoria	1 TB
	Porte	2 HDMI, 4 USB, Rj-45 Gigabit Ethernet
	Dati output	.ply, .las
IMU	Tipologia	MEMS
	Gradi di Libertà	X,Y,Z, rollio, beccheggio, imbardata
Caratteristiche fisiche	Dimensioni	162 mm x 111mm x 141 mm
	Peso	1,73 kg

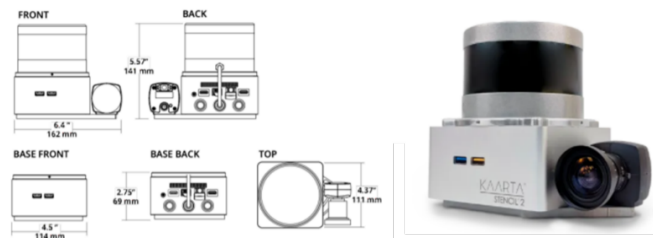


Fig. 1. KAARTA Stencil 2-16, dimensioni dello strumento e sue componenti

3.1 Casi studio

Nella fase precedente all'acquisizione dati è opportuno conoscere la tipologia di scena in cui si va a rilevare. Le caratteristiche intrinseche dell'ambiente stesso possono influenzare alcuni fattori dei dati di *output*. A seconda del diverso ambito applicativo si richiede di configurare i parametri del sistema poiché tengono conto della risoluzione della nuvola di punti che si andrà a generare. Sono stati eseguiti dei test in diversi tipi di ambiente *outdoor* e *indoor* per vari casi studio quali beni culturali, *smart city*, ambiente forestale, monitoraggio ambientale, ambiente sotterraneo e ambiente *retail*. Tali test applicativi sono stati eseguiti a livello del suolo in modalità *hand-held*, sorretto

su di un'asta telescopica. In seguito alla fase di campagna, sono stati effettuati processi di analisi delle nuvole di punti tramite *software*, come ad esempio CloudCompare [18], che hanno permesso di fare osservazioni sulla performance di questa tecnica di rilievo geomatico. La precisione e l'accuratezza delle nuvole di punti sono state validate anche attraverso un confronto C2C (*Cloud to Cloud*) con quelle generate da TLS o dalla fotogrammetria, quest'ultime usate come *ground truth*, come si vedrà nella sezione 4.

Di seguito vengono illustrate tipologie di ambienti in cui è stato testato questo MLS e precisamente sono state raggruppate in: ampio, vegetale e ingombro, stretto. Tale classificazione non è basata sui domini dei vari campi applicativi ma si basa sulla diversa configurazione dei parametri di sistema, in base alle caratteristiche intrinseche della scena da acquisire. Per ciascuna di queste categorie vengono descritti uno o più contesti diversi ed i valori dei parametri configurati sono indicati in Tabella 2.

Tabella 2. Configurazione parametri per le varie categorie di ambienti

Parametri		Ambienti		
		ampio	vegetale/ingombro	stretto
<i>scanRegistration</i>	<i>voxelSize</i>	0.2	0.3 o 0.4	0.1 o 0.15
	<i>blindRadius</i>	2.0	2.0	1.0
<i>laserMapping</i>	<i>cornerVoxelSize</i>	0.2	0.3 o 0.4	0.1 o 0.15
	<i>surfVoxelSize</i>	0.4	0.6 o 0.8	0.2 o 0.3
	<i>surroundVoxelSize</i>	0.6	0.9 o 1.2	0.3 o 0.45

Ambienti ampi. Questa prima categoria di ambienti di utilizzo concerne il rilievo di ampi spazi esterni come quelli urbani o di beni culturali di grande scala. Essi presentano tipicamente molte superfici ben definite e caratterizzano un ambiente antropizzato, situazione ideale per lo strumento, perciò vengono impiegate le impostazioni di *default*.

Il primo caso di studio riguarda il rilievo della cinta muraria di San Ginesio (MC) [19] (Fig. 2a). Le mura racchiudono il centro storico con una pianta irregolare a tratti lineari e sporgenze, torri e quattro porte di ingresso. Hanno subito una serie di danneggiamenti in seguito ai terremoti che hanno colpito il centro Italia nel 2009 e nel 2016. La rappresentazione tridimensionale della nuvola di punti delle mura ha permesso di riprodurre il modello geometrico su una piattaforma (H)BIM (Historical Building Information Modelling) e l'identificazione delle forme di degrado utili per un progetto di pianificazione di interventi di restauro e di consolidamento strutturale. Per eseguire percorsi chiusi con il MLS rilevando entrambe le parti delle mura (esterne e interne) sono stati sfruttati i varchi aperti delle porte che intervallano la cinta muraria.

Un altro caso studio, che rientra in questa categoria di ampi spazi urbani e complessi, è rappresentato da aree della zona industriale della città di Brescia [20] (Fig. 2b). Compiendo alcuni rilievi su percorsi chiusi lungo alcuni assi viari è stato possibile ricostruire tridimensionalmente lo spazio urbano. Lo scopo di questo test eseguito con il MLS è quello di verificare il livello di dettaglio ottenuto e di identificare elementi che descrivono l'edilizia industriale, l'arredo urbano e le eventuali segnaletiche verticali e orizzontali come la cartellonistica.

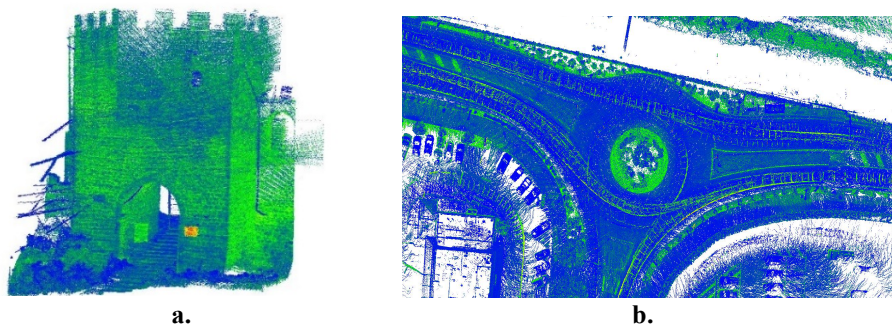


Fig. 2. **a.** Particolare di una porta della cinta muraria di S. Ginesio (MC). **b.** Dettaglio di un asse viario della zona industriale di Brescia.

Un caso studio diverso dagli ambienti precedenti, inseriti in un contesto urbano, è quello rappresentato dal rilievo di una parete rocciosa, sottoposta a monitoraggio, sita a Cortes de Pallas nella regione di Valencia (Spagna) [21]. Questo versante roccioso è costeggiato da una strada che ha consentito di eseguire il rilievo con il MLS. È stato qui testato il KAARTA Stencil 2-16 per rilevare parti della parete rocciosa in prossimità della strada stessa (Fig. 3). È stato inoltre eseguito un rilievo con fotogrammetria terrestre con una camera, posta ad una certa distanza dal sito d'interesse, che però non ha presentato un dato completo del modello tridimensionale del sito, mancanza dovuta alla presenza di ostacoli visivi. In generale, il MLS usato in modalità *hand-held* non viene ampiamente utilizzato nel monitoraggio dei pendii rocciosi, ma in questo caso di studio è stato utile per rilevare aree della scena rilevata non chiaramente visibili attraverso la fotogrammetria, come strade o parti ostruite dalla chioma di alberi.

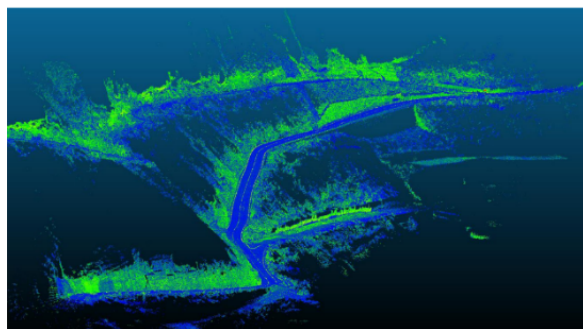


Fig. 3. Vista prospettica della parete rocciosa sita a Cortes de Pallas (Valencia) rilevata con il KAARTA Stencil 2-16

Ambienti vegetali e ingombri. Questa seconda categoria concerne il rilievo di quelli che richiedono un andamento articolato del percorso da eseguire in fase di acquisizione.

Un primo caso riguarda il rilievo di un'area del Bosco delle Cesane presso Fossombrone (PU) (Fig. 4a) la cui indagine di scansione, con il MLS, è stata eseguita a piedi in un percorso chiuso, caratterizzato da diverse intersezioni della traiettoria tra i filari di alberi. È stata ottenuta una nuvola di punti da cui sono stati estratti i dati metrici, dunque, le definizioni altimetriche degli alberi e quelle volumetriche dei fusti.

Nel secondo caso studio si è effettuata una indagine di uno spazio interno ingombro, nello specifico un supermercato [22] (Fig. 4b), con lo scopo di ottenere una mappatura che aiutasse ad identificare la distribuzione dei prodotti. Da qui l'utilizzo del MLS per l'acquisizione di dati 3D per la ricostruzione tridimensionale dell'intero ambiente, dunque per fornire una base per una classificazione semantica attraverso la segmentazione di nuvole di punti ottenute con lo strumento. Il percorso è stato effettuato intersecando più volte le varie traiettorie con lo scopo di ottenere una maggiore definizione di tutti gli oggetti nel campo visivo, elementi strutturali compresi.

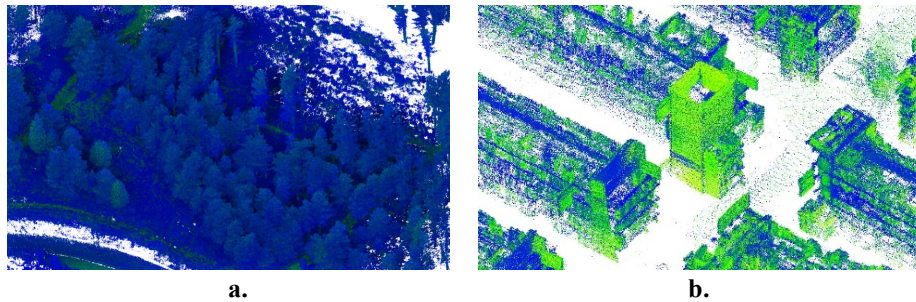


Fig. 4. a. Vista aerea dell'area boschiva rilevata con il MLS presso la riserva naturale delle Cesane, Fossombrone (PU). b.

Ambienti stretti. In questa categoria rientrano quella tipologia di spazi che sono caratterizzati da una larghezza limitata, che si possono trovare in ambienti interni di edifici come anche in stretti passaggi sotterranei.

Il KAARTA Stencil 2-16 è stato testato in due contesti simili tra loro di ambiente *underground* (Fig. 5a, Fig. 5b) dove, grazie alla presenza di luce artificiale necessaria per il *features tracker*, ha permesso di ottenere un modello tridimensionale con un buon livello di dettaglio.

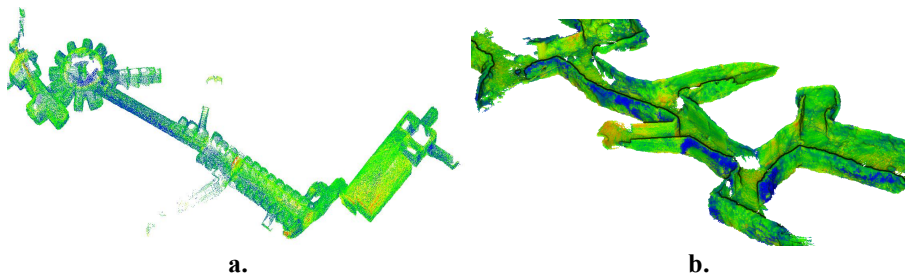


Fig. 5. a. Nuvola di punti di una parte della rete sotterranea delle Grotte di Camerano (AN). b. Sezione che mostra l'articolazione strutturale di una trincea sita nel Monte Celva, Trento.

4 Risultati

Questa sezione è dedicata all'analisi delle performance del KAARTA Stencil 2-16 sulla base dei rilievi eseguiti. I fattori che determinano la qualità dei dati acquisiti dal MLS, in termini di livello di accuratezza, precisione e completezza, sono elencati di seguito.

Caratteristiche tecniche dell'unità laser. Si fa riferimento alle caratteristiche relative dell'unità laser, alla modalità di misurazione della distanza, al campo di acquisizione, al campo visivo. In alcune MLS esiste una relazione tra l'asse del sistema di rotazione del raggio laser (quindi la sua esposizione) e la direzione della nuvola di punti dell'oggetto rilevato. La rotazione verticale attorno all'asse y del fascio laser generato dal Velodyne VPL-16 del KAARTA corrisponde a tracce di profilo quasi orizzontali [23].

Configurazione parametri di sistema. È buona pratica settare i valori dei parametri in base al tipo di ambiente da rilevare. L'impostazione viene eseguita con inserimento manuale dei valori da parte degli esperti utilizzatori del MLS, supportati da documentazione scientifica [24]. Questa operazione deve essere effettuata precedentemente alle operazioni di acquisizione.

Metodo di esecuzione del rilievo. La risoluzione e la completezza dei dati rilevati dal MLS, come il KAARTA, sono anche dipendenti dall'abilità dell'operatore e dalla velocità di avanzamento dell'acquisizione [25]. Nel caso di ambienti caratterizzati da variazione delle dimensioni degli spazi da rilevare, come gli ambienti indoor e, considerando la piccola scala del rilievo, il percorso dovrebbe essere uniforme e regolare per evitare svolte improvvise. Vanno inoltre considerate la larghezza della zona di transizione o di passaggio come la porta tra due stanze. Il sistema KAARTA utilizzato nei vari esempi precedenti non è dotato di GNSS. Si consiglia di eseguire *loop* chiusi nella stessa posizione del punto di partenza e dei *roundtrip*, anche intersecanti, durante l'operazione di mappatura. Ciò facilita l'algoritmo SLAM e i dati IMU all'elaborazione delle transizioni e delle rotazioni, al fine di garantire il miglior allineamento minimizzando o assicurando un'adeguata ridistribuzione degli errori accumulati lungo la traiettoria (es. *drift*). Questa tecnica conferisce una maggiore rigidità nella ricostruzione 3D degli spazi rilevati. La nuvola di punti generata dal MLS viene geolocalizzata in un sistema di riferimento relativo. L'identificazione da parte del fascio laser di *target (marker)* con superfici riflettenti consente la loro facile individuazione nella nuvola di punti finale e possibilità di poterla rototraslare in un sistema geodetico noto grazie al rilievo topografico. Va inoltre sottolineato che, nel caso della modalità d'uso *hand-held*, in funzione all'esposizione in direzione orizzontale del fascio laser, il dispositivo laser, sorretto dall'asta, viene posto ad una posizione superiore all'altezza effettiva dell'operatore che lo sta utilizzando. Come riportato nel manuale d'uso del KAARTA per poter rilevare superfici verticali più alte rispetto all'apertura del fascio laser, è possibile inclinare lo strumento, ma non più di 15° in modalità ferma.

Caratteristiche intrinseche della scena rilevata. Le prestazioni del KAARTA Stencil 2-16 si differenziano a seconda del contesto di acquisizione (indoor e outdoor o spazi ampi o stretti). Si suggerisce sempre di ispezionare la scena o il sito di interesse per individuare situazioni critiche e la presenza di ostacoli che possono compromettere

la corretta esecuzione delle operazioni di acquisizione [26]. Una scarsa illuminazione, specialmente in ambienti indoor e underground, per il feature tracker visual-based, la presenza di oggetti in movimento (come veicoli, chiome di alberi) o di persone, e la presenza di superfici lisce o riflettenti (come le superfici vetrate e i bacini acquatici), possono causare la perdita di orientamento o aumentare gli effetti di rumore della registrazione, chiaramente visibili quando si analizza la nuvola di punti.

Al termine del rilievo, la nuvola di punti viene subito processata ed elaborata dal sistema interno del KAARTA. I *files* di *output* ottenuti vengono automaticamente catalogati in una cartella nell'unità di memoria del computer. Tale cartella contiene i seguenti dati: *file .ply* della nuvola di punti e della traiettoria compiuta, *file .bag* dei sensori laser, *files .txt* contenenti informazioni relative a tempo di scansione, distanza percorsa, indice dei parametri configurati e infine i dati grezzi (*raw data*) delle immagini ottenute con il *features tracker*. Le nuvole di punti della scena rilevata e della traiettoria percorsa possono essere analizzate tramite un software di elaborazione come CloudCompare. La possibilità di collegare un monitor portatile sia in modalità wireless sia via cavo, consente di poter controllare, in tempo reale, l'avanzamento delle operazioni di rilievo e, a fine rilievo, i dati per assicurarsi della loro corretta acquisizione. La validazione dei risultati ottenuti con il KAARTA Stencil 2-16 si basa sui seguenti aspetti e osservazioni.

Caratteristiche della nuvola di punti. La nuvola di punti generata dal KAARTA si presenta molto densa e particolarmente precisa. Si presenta in scala di grigi (grey scale) e viene inoltre visualizzata nella scala dei valori scalari di tempo, intensità e riflettanza. Questi ultimi conferiscono una facile e corretta interpretazione della nuvola di punti stessa, mostrando gli oggetti acquisiti seguendo l'andamento del rilievo (time) e consentendo l'individuazione degli elementi presenti sulla base delle loro caratteristiche intrinseche come dimensione, componente materica ed esposizione rispetto al fascio laser (intensity, reflectance). Soffermandosi sugli esempi citati nella sezione precedente, dalla nuvola di punti è possibile individuare la dimensione dei conci di pietra delle mura di S. Ginesio (Fig. 2a), riconoscere gli elementi della segnaletica orizzontale delle strade di uno spazio urbano (Fig. 2b), le varie dimensioni volumetriche dei tronchi (Fig. 4a) o i diversi prodotti esposti in un ambiente retail (Fig. 4b). Sulla base della riflettanza, grazie anche al calcolo delle normali dei punti, è possibile ricostruire la superficie di una parete rocciosa (Fig. 3) e ottenere la volumetria di un ambiente indoor o sotterraneo (Fig. 5a, Fig. 5b).

Analisi della nuvola di punti. Grazie ai software di gestione e analisi delle nuvole di punti, come CloudCompare, è possibile fare delle valutazioni sulle nuvole di punti. Una prima operazione di analisi consiste nel controllo della linea di punti che descrive la traiettoria del percorso eseguito. Se si presentano forme di errore, come drift o non corretta registrazione del loop closure, esistono, tra le funzionalità del KAARTA e sul software CloudCompare, strumenti per operare delle correzioni. Tale modifiche permettono di aggiustare anche la distribuzione dei punti della point cloud della scena rilevata. Per quanto riguarda l'analisi della precisione e dell'accuratezza della nuvola di punti del MLS, una delle operazioni che si può effettuare è quella del calcolo della distanza CloudToCloud (C2C) usando come ground truth la nuvola di punti corrispondente, generata con TLS (Fig. 6) o fotogrammetria (Fig. 7). Per un corretto

ottenimento della distribuzione gaussiana della distanza è bene prima procedere con l'algoritmo del closest point che consente alla nuvola di punti, presa come riferimento, di eliminare quei punti che non trovano un loro vicino, o un intorno nella nuvola di punti del MLS. Una volta individuato il livello di dettaglio è possibile stimare la tolleranza dei dati acquisiti. Ad esempio, nel caso di un rilievo effettuato dal MLS in un contesto architettonico o strutturale (scala dell'edificio), una precisione centimetrica o decimetrica corrisponde a una scala di rappresentazione grafica 1:100-1:200 [14].

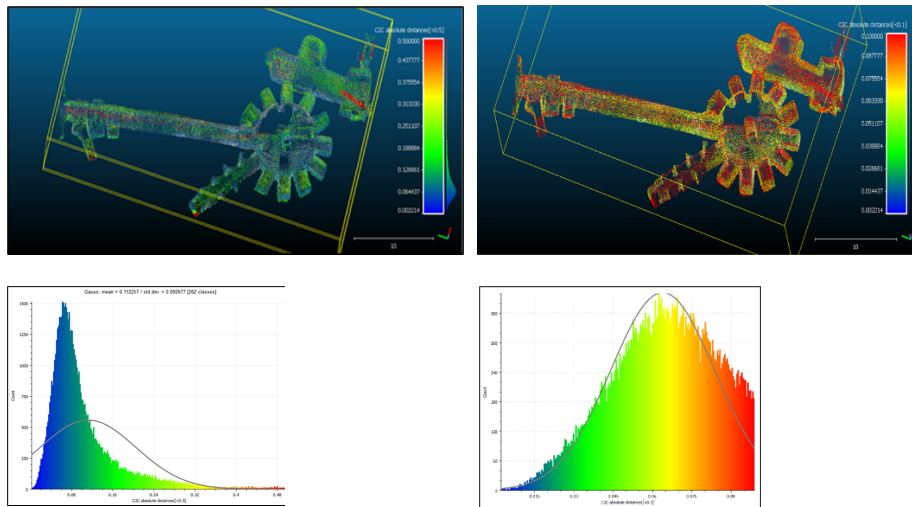


Fig. 6. Calcolo della distanza C2C tra MLS (KAARTA Stencil 2) e TLS (Z+F Imager 5010) a due differenti valori di soglia. Esempio verificato nel caso studio Grotte di Camerano (AN).

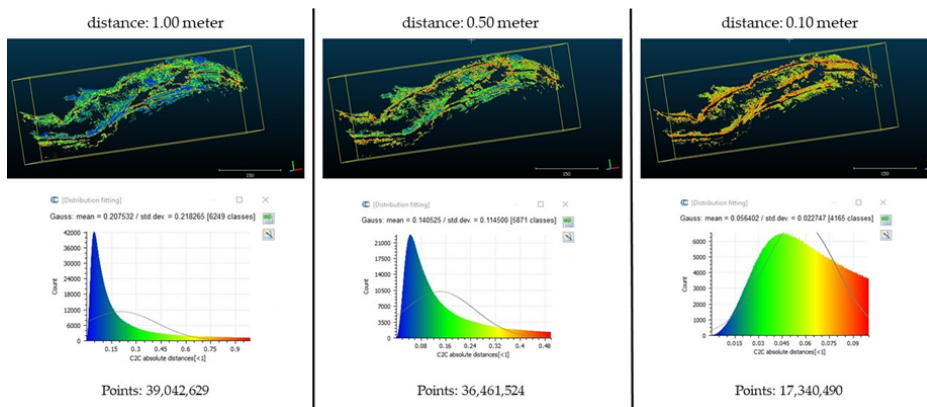


Fig. 7. Calcolo della distanza C2C tra MLS (KAARTA Stencil 2) e fotogrammetria terrestre (Canon EOS D5) a tre differenti valori di soglia. Esempio verificato nel caso studio Cortes de Pallas, Valencia (Spagna).

5 Conclusioni

In questo articolo si è parlato della tecnologia *mobile 3D scan* LiDAR applicato in campo geomatico descrivendo alcune sue caratteristiche peculiari. E' stato usato come esempio di MLS lo strumento KAARTA Stencil 2-16 in possesso del gruppo di ricerca GAP, di cui fanno parte gli autori di questo contributo. Tale dispositivo laser mobile è stato testato in vari contesti tenendo conto di diversi fattori quali la configurazione dei parametri in base alla tipologia di ambiente rilevato, la corretta modalità di esecuzione del rilievo sulla base del *loop-closure*, in assenza di sistema GNSS, e la qualità del dettaglio finale della nuvola di punti ottenuta in termini di accuratezza e completezza del dato. A conclusione dei risultati ottenuti è emerso che tale tecnologia può rappresentare una valida alternativa che consente di eseguire rilievi in minor tempo e con un numero inferiore di personale richiesto. Non sono mancati fattori di criticità, emersi dai dati di *output* del rilievo, che hanno però permesso di approfondire l'uso corretto di tale tecnologia.

Riferimenti bibliografici

1. Puente, I., et al.: Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127-2145 (2013).
2. Ullrich, A. & Pfennigbauer M.: Advances in lidar point cloud processing, Proc. SPIE 11005, Laser Radar Technology and Applications XXIV, 110050K (2019).
3. Di Pietra, V., et al.: Characterization of a Mobile Mapping System for Seamless Navigation. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 43, 227-234 (2020).
4. KAARTA Stencil 2 Homepage, <https://www.kaarta.com/products/stencil-2-for-rapid-long-range-mobile-mapping/>, ultimo accesso 2021/06/01.
5. GAP Geomatics Applications and Processing, <http://www.gapgeomatica.it/>, ultimo accesso 2021/14/05.
6. Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138.
7. Toschi, I., Fabio, R., & Simone, O. (2015). Mobile Mapping Systems : recenti sviluppi e caso applicativo. *GEOMedia*, 4, 6–10.
8. Westling, F., Mahmud, K., Underwood, J., & Bally, I. (2020). Replacing traditional light measurement with LiDAR based methods in orchards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179(May).
9. Gollob, C., Ritter, T., & Nothdurft, A. (2020). Forest Inventory with Long Range and High-Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology. *Remote Sensing*, 12(9), 1509.
10. Chang, L., Niu, X., Liu, T., Tang, J., & Qian, C. (2019). GNSS/INS/LiDAR-SLAM integrated navigation system based on graph optimization. *Remote Sensing*, 11(9).
11. Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors (Switzerland)*, 12(9), 11712–11733.
12. Razavian, R. S., Greenberg, S., & McPhee, J. (2019). Biomechanics imaging and analysis. In *Encyclopedia of Biomedical Engineering* (Vols. 1–3). Elsevier.
13. Chang, L., Xiaoji, N., & Tianyi, L. (2020). GNSS / IMU / ODO / LiDAR-SLAM Integrated Navigation System Using IMU / ODO Pre-Integration. *Sensors*.

14. Bronzino, G. P. C., Grasso, N., Matrone, F., Osello, A., & Piras, M. (2019). LASER-VISUAL-INERTIAL ODOMETRY BASED SOLUTION for 3D HERITAGE MODELING: The SANCTUARY of the BLESSED VIRGIN of TROMPONE. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(2/W15), 215–222.
15. Cabo, C., Pozo, S. Del, Rodr, P., & Gonz, D. (2018). Comparing Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Wearable Laser Scanning (WLS) for Individual Tree Modeling at Plot Level. *Remote Sensing*, 10(540), 1–16
16. G. Petri, Mobile mapping systems: an introduction to the technology, *GeoInformatics* 13 (1), 32–43 (2010).
17. Zhang, J. and Singh, S., 2018. Laser–visual–inertial odometry and mapping with high robustness and low drift. *Journal of Field Robotics*, 35(8), pp.1242-1264.
18. CloudCompare software, <https://www.danielgm.net/cc/>, ultimo accesso 2021/03/15
19. Di Stefano, F., Gorreja, A., Malinverni, E. S., & Mariotti, C. (2020). Knowledge Modeling for Heritage Conservation Process: from Survey to Hbim Implementation. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 44, 19-26.
20. Chiappini, S., Fini, A., Malinverni, E. S., Frontoni, E., Racioppi, G., & Pierdicca, R. (2020). Cost Effective Spherical Photogrammetry: a Novel Framework for the Smart Management of Complex Urban Environments. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 441-448.
21. Di Stefano, F., Cabrelles, M., García-Asenjo, L., Lerma, J. L., Malinverni, E. S., Baselga, S., ... & Pierdicca, R. (2020). Evaluation of Long-Range Mobile Mapping System (MMS) and Close-Range Photogrammetry for Deformation Monitoring. A Case Study of Cortes de Pallás in Valencia (Spain). *Applied Sciences*, 10(19), 6831.
22. Paolanti, M., Pierdicca, R., Martini, M., Di Stefano, F., Morbidoni, C., Mancini, A., ... & Zingaretti, P. (2019, September). Semantic 3D object maps for everyday robotic retail inspection. In *International Conference on Image Analysis and Processing* (pp. 263-274). Springer, Cham.
23. Tucci, G., Visintini, D., Bonora, V., & Parisi, E. I. (2018). Examination of indoor mobile mapping systems in a diversified internal/external test field. *Applied Sciences*, 8(3), 401.
24. Di Stefano, F., Chiappini, S., Piccinini, F., & Pierdicca, R. (2020). *Integration and Assessment Between 3D Data from Different Geomatics Techniques. Case Study: The Ancient Urban Walls of San Ginesio (Italy)*.
25. Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Toschi, I., & Rodríguez-Gonzálvez, P. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems. *Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, 10332, 103320I.
26. di Filippo, A., Sánchez-Aparicio, L. J., Barba, S., Martín-Jiménez, J. A., Mora, R., & Aguilera, D. G. (2018). Use of a wearable mobile laser system in seamless indoor 3D mapping of a complex historical site. *Remote Sensing*, 10(12).