



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Triennale in  
INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

**I NUOVI METODI PER IL RILIEVO  
TRIDIMENSIONALE: STRUMENTI SLAM A  
CONFRONTO**

*New methods for three-dimensional surveying:  
SLAM instruments in comparison*

Relatore: *Chiar.ma*  
*Prof.ssa*  
*Eva Savina*  
**MALINVERNI**

Tesi di Laurea di:  
**Francesco DI LUCA**

Correlatore: Dott. Ing.  
**Francesco DI STEFANO**

A.A. 2020/2021

## INDICE

<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>2 RILIEVO TRIDIMENSIONALE TRAMITE TECNICA LASER SCANNING .....</b>	<b>2</b>
2.1 LASER SCANNER MOBILE .....	9
2.1.1 SISTEMI DI NAVIGAZIONE .....	14
<b>3 STRUMENTI.....</b>	<b>16</b>
<b>4 CASO STUDIO .....</b>	<b>20</b>
<b>5 FASE DI ACQUISIZIONE .....</b>	<b>22</b>
5.1 RILIEVO GNSS.....	23
5.2 RILIEVI CON MLS .....	24
<b>6 FASE DI ELABORAZIONE .....</b>	<b>26</b>
6.1 REGISTRAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI .....	27
6.2 GEOREFERENZIAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI .....	29
6.3 PULIZIA E FILTRAGGIO DELLA NUVOLA DI PUNTI .....	31
<b>7 ANALISI DELLE NUVOLE DI PUNTI .....</b>	<b>33</b>
7.1 CONFRONTO E VERIFICA DELL'ACCURATEZZA .....	34
<b>8 CONCLUSIONI .....</b>	<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA .....</b>	<b>40</b>



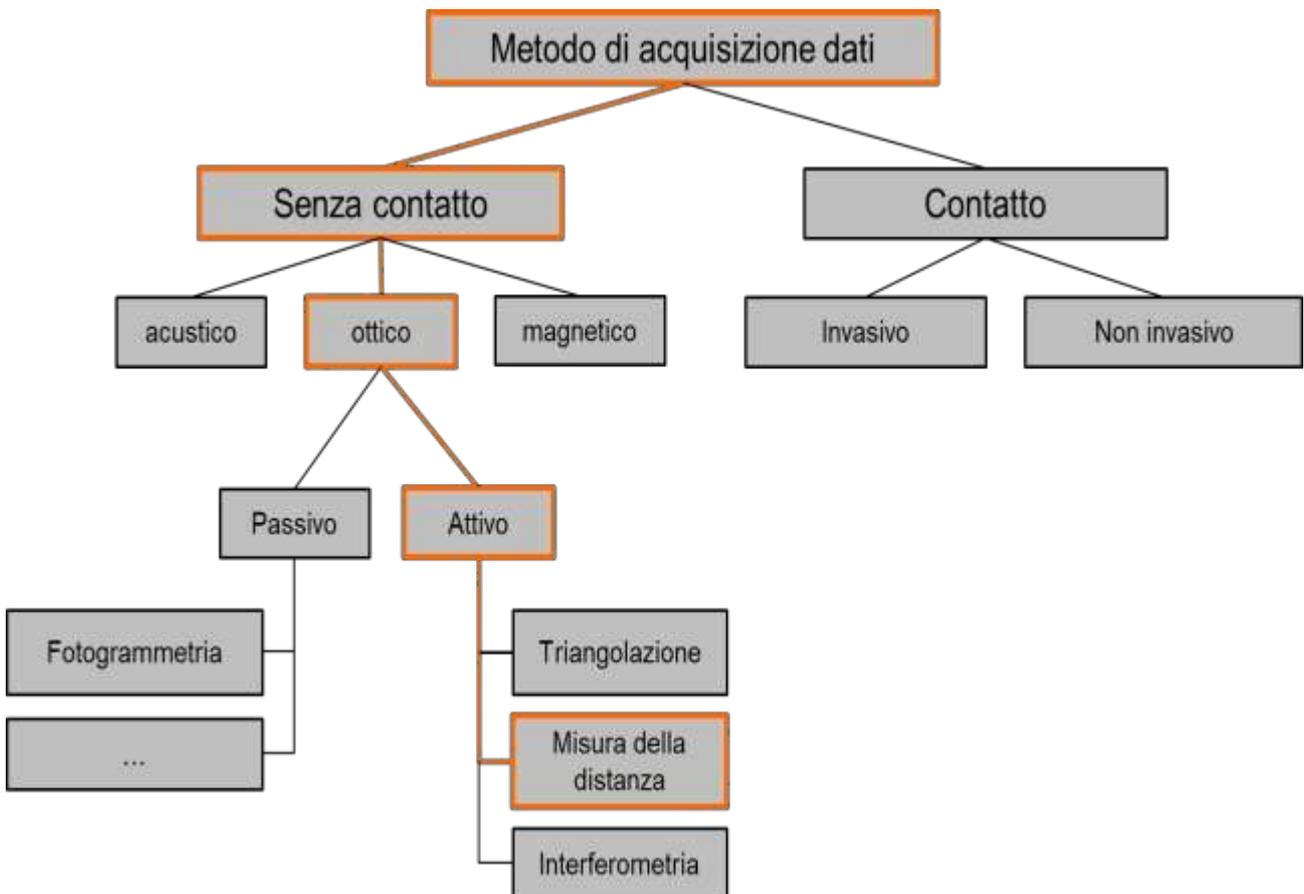
# 1 Introduzione

Lo scopo di questa Tesi è quello di illustrare la tecnica del rilievo tridimensionale attraverso l'uso del laser scanning, in particolare di quei dispositivi che vengono usati per eseguire rilievi in movimento. Il laser scanner mobile rappresenta un'ultima frontiera del rilievo geomatico e, basato sulla tecnologia SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), viene ormai utilizzato in ogni campo di applicazione. Si tratta di uno strumento facile da utilizzare e adatto per ambienti *indoor* e *outdoor*, in breve tempo consente di creare un modello 3D estremamente preciso. Questa nuova frontiera del rilievo è stata progettata per garantire risultati veloci e allo stesso tempo di qualità, inoltre grazie alla tecnologia SLAM è anche possibile effettuare rilievi in aree con assenza di segnale GPS, come ad esempio negli spazi interni, in gallerie e in ambienti fitti di vegetazione.

Per il caso studio scelto, trattasi di un'area esterna della Facoltà di Ingegneria di Ancona (UNIVPM), sono stati testati due MLS (Mobile Laser Scanner): GeoSLAM ZEB Horizon e KAARTA Stencil 2-16. Questi due strumenti sono stati messi a confronto sia sotto il profilo delle caratteristiche tecniche, ma anche sulla loro modalità di uso in fase di acquisizione e sulla successiva fase di elaborazione dei dati ottenuti. Un ulteriore confronto è basato sull'analisi Cloud-To-Cloud per verificare il grado di accuratezza e il livello di dettaglio raggiunti. Le osservazioni finali hanno permesso di evidenziare le potenzialità e le criticità di tale tecnica di rilievo e dei due strumenti testati.

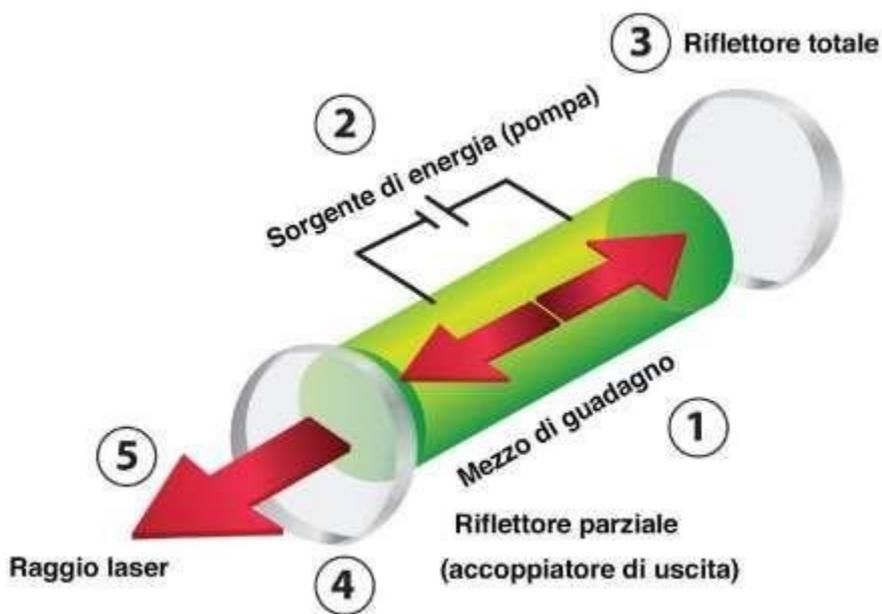
## 2 RILIEVO TRIDIMENSIONALE TRAMITE LA TECNICA DEL LASER SCANNING

Tra le diverse tecniche di rilievo tridimensionale (3D), il laser scanning si caratterizza dall'acquisizione dei dati e quindi dalla misura delle distanze mediante un procedimento ottico di tipo attivo senza contatto, ovvero si basa sull'utilizzo di sensori laser scanner (anche denominati laser 3D), strumenti che permettono il rilevamento di geometrie e sagome tridimensionali di oggetti a grandezze e risoluzioni differenti.



Per capirne il funzionamento bisogna in primis chiarire il concetto della parola laser e la metodologia d'utilizzo che ne permette l'effettuazione di misure.

Il laser (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation - amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione) non è altro che uno strumento che trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata: la luce laser.



Le componenti di tale strumentazione sono:

- 1) Cavità ottica
- 2) Energia esterna per pompaggio
- 3) Specchio riflettente (100%)
- 4) Specchio semiriflettente (80-99%)
- 5) Luce laser

La luce laser sarà quindi caratterizzata da:

-**monocromaticità**, ovvero presenta un'unica colorazione cromatica a differenza ad esempio della luce di una torcia che nella maggior parte appare bianca, la quale è formata da diverse frequenze di luce appartenenti allo spettro visibile all'occhio umano (Fig. 1);

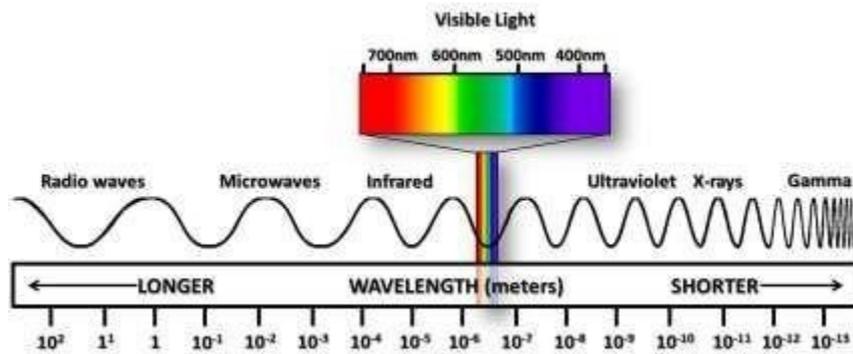


Figura 1-Spettro elettromagnetico, insieme di tutte le possibili frequenze della radiazione elettromagnetica. Suddiviso nella parte di spettro visibile, posta al centro (luce, 430-700 nm ), e in quelle a frequenza minore e maggiore del visibile.

Definiamo con il termine *LUCE* un'onda elettromagnetica che è caratterizzata da: una velocità di propagazione ( $v$ ), una frequenza ( $f$ ) ed una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) tale che  $\lambda=v/f$ .

-**unidirezionalità**, ovvero composta da un'onda che non viene irradiata in tutte le direzioni, ma bensì si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità permettendo così di essere focalizzata su punti molto piccoli;

-**coerenza**, ovvero costituita da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano dando origine ad un unico fascio di luce che può essere proiettato ad alta intensità ed elevata potenza.

Ed è proprio grazie a queste caratteristiche che la luce laser è adatta per la misurazione della distanza.

## Laser scanner

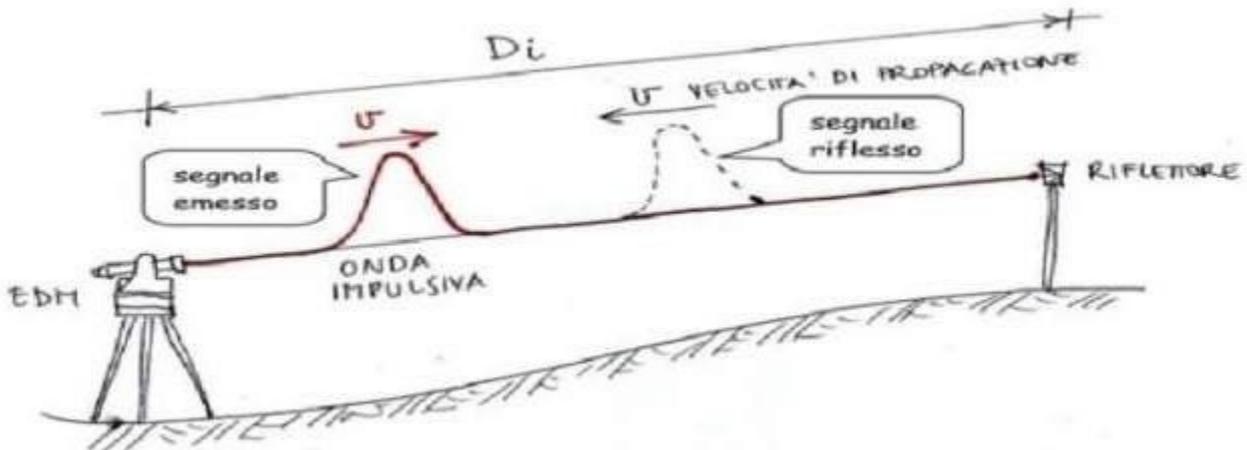
Tale strumento che basa il suo funzionamento sull'utilizzo della luce laser, viene adoperato in diversi campi operativi, che spaziano dall'utilizzo per fini industriali a quelli basati per la cura e la prevenzione della salute umana.

Noi, da come si intuisce anche dalle argomentazioni trattate in questo studio, utilizziamo e studiamo questa tecnologia nel campo della *GEOMATICA*. Disciplina che integra le nuove tecnologie informatiche con i diversi settori tecnico-scientifici relativi al rilevamento e al trattamento dei dati ambientali e territoriali (cartografia, geodesia, rilievo catastale, fotogrammetria, telerilevamento, sistemi informativi territoriali).

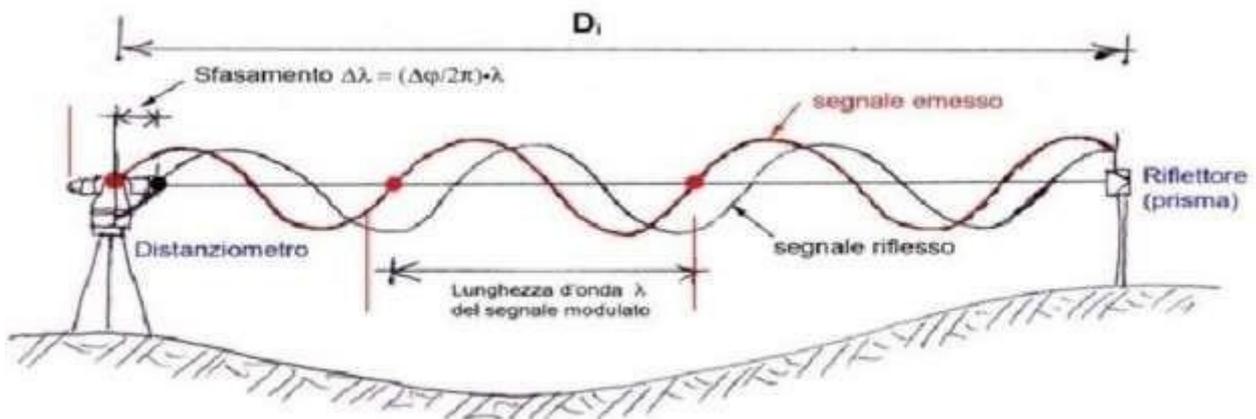
Viene definito scanner poiché l'acquisizione dei dati avviene mediante specifici criteri di organizzazione dei dati raccolti, uguali a quelli degli strumenti a scansione tradizionale, un esempio su tutti è lo scanner piano. Bisogna però dapprima specificare che tra gli scanner vi è una prima fondamentale differenziazione in merito all'acquisizione dei dati e quindi alla misurazione della distanza, in due principali sottogruppi, da una parte abbiamo la tipologia *TRIANGULATION SCANNER* caratterizzata dal fatto che l'emettitore è diverso dal ricevitore, dall'altra parte la tecnologia *RANGING SCANNER* che invece è caratterizzata dal fatto che l'emettitore e il ricevitore coincidono. Quest'ultima tipologia di strumentazione corrisponde a quella che tratteremo, essa si distingue dalla prima in quanto è possibile raggiungere distanze elevate di rilievo, che sia esso un oggetto o una scena, a discapito di una minore precisione che non scende sotto l'ordine del centimetro.

All' interno poi del mondo degli scanner a tipologia *RANGING SCANNER* troviamo due metodologie di misurazione diverse:

-tempo di volo (TOF-time of flight);



-differenza di fase (phase shift).



Tali sistemi possono essere identificati nella capacità di effettuare misure in modo automatico e sistematico, nella velocità di acquisizione dati (si arriva fino a più di mille punti al secondo) e nella possibilità da parte di chi usa lo strumento di poter avere dati in output in tempo reale. Un' ultima differenziazione la troviamo nella massima distanza che lo strumento in esame può effettuare la misura, definiamo questa capacità con il termine PORTATA ed è funzione della qualità dello strumento. Il valore massimo di portata raggiungibile dipende dalle caratteristiche del segnale emesso,

dalla direzione in cui il raggio laser colpisce la superficie dell'oggetto, dalle caratteristiche di riflettività della superficie, dalla presenza o meno di disturbi e interferenze del segnale laser, come sorgenti luminose artificiali, luce solare e altre radiazioni luminose riflesse, od ancora da materiali con elevato potere radio-assorbente o materiali che vengono attraversati dal segnale luminoso, esistono anche interferenze di superficie date dal tipo di materiale o dalle inclinazioni che presentano, ed infine condizioni d'umidità.

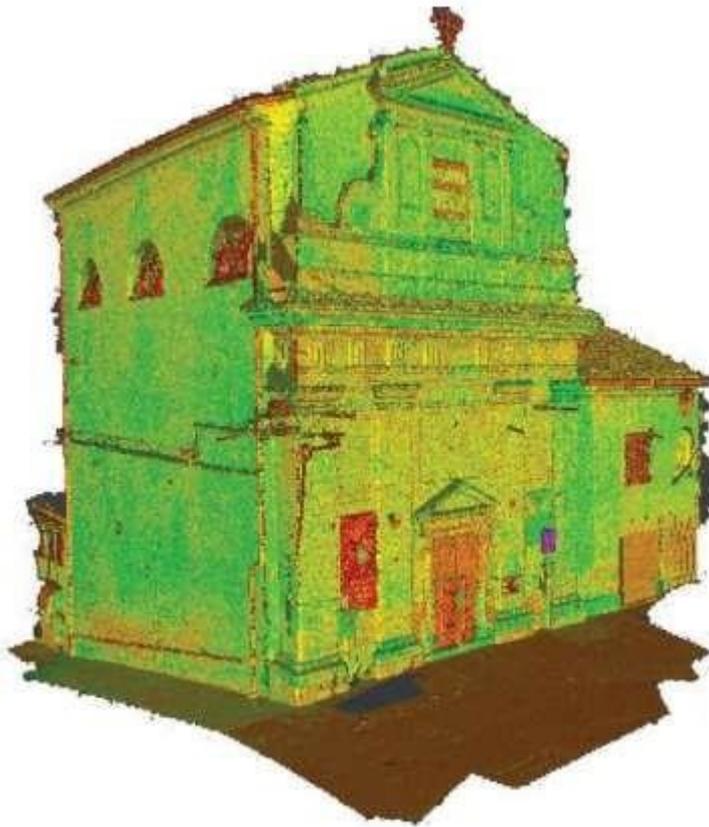
Le componenti principali di un laser scanner sono:

- l'unità laser (laser unit)**, ovvero la componente che gestisce e controlla l'emissione del raggio laser;
- l'unità di rotazione (rotation unit)**, ovvero la componente che gestisce e permette la rotazione, sia negli scanner statici che negli scanner mobili, lungo gli assi (x,y). In modo da avere un rilievo a 360° attorno le due direzioni principali;
- l'unità di memoria (control and recording unit)**, ovvero la componente che garantisce il salvataggio ed il controllo di tutti i dati acquisiti, permettendone il download e il passaggio su altri dispositivi;
- l'unità di navigazione (navigation unit)**, ovvero la componente che permette di determinare la posizione dello strumento mentre si compie un rilievo in movimento, intesa come localizzazione sul sistema locale dello strumento stesso. Essa è, infatti, la componente che è presente soltanto negli scanner mobili e che li differenzia da quelli statici, i quali ne sono privi.

Inoltre nei laser scanner possiamo trovare anche delle componenti secondarie, cosiddette aggiuntive, che si possono fisicamente sovrapporre mediante delle apposite giunture di installazione, come:

- camera**, utilizzabile nel caso in cui si debba ottenere una nuvola di punti colorata, essa infatti durante la misurazione compie foto e video, da i quali è possibile catturare dei frame, che consentono di colorare la nuvola di punti sulla scala RGB;
- sistema GNSS**, componente che consente di geo-referenziare la nuvola di punti in un sistema di riferimento geografico noto, come ad esempio i punti GPS.

Infine per quanto riguarda l'output finale dello strumento, la nuvola di punti (point cloud) (Fig. 2), anche definita **range scan**, è il risultato del rilievo 3D eseguito tramite laser scanner. Essa è rappresentata da un insieme di punti che costituiscono un modello tridimensionale dell'oggetto rilevato in cui sono note le coordinate (x,y,z) di ciascun punto misurato.



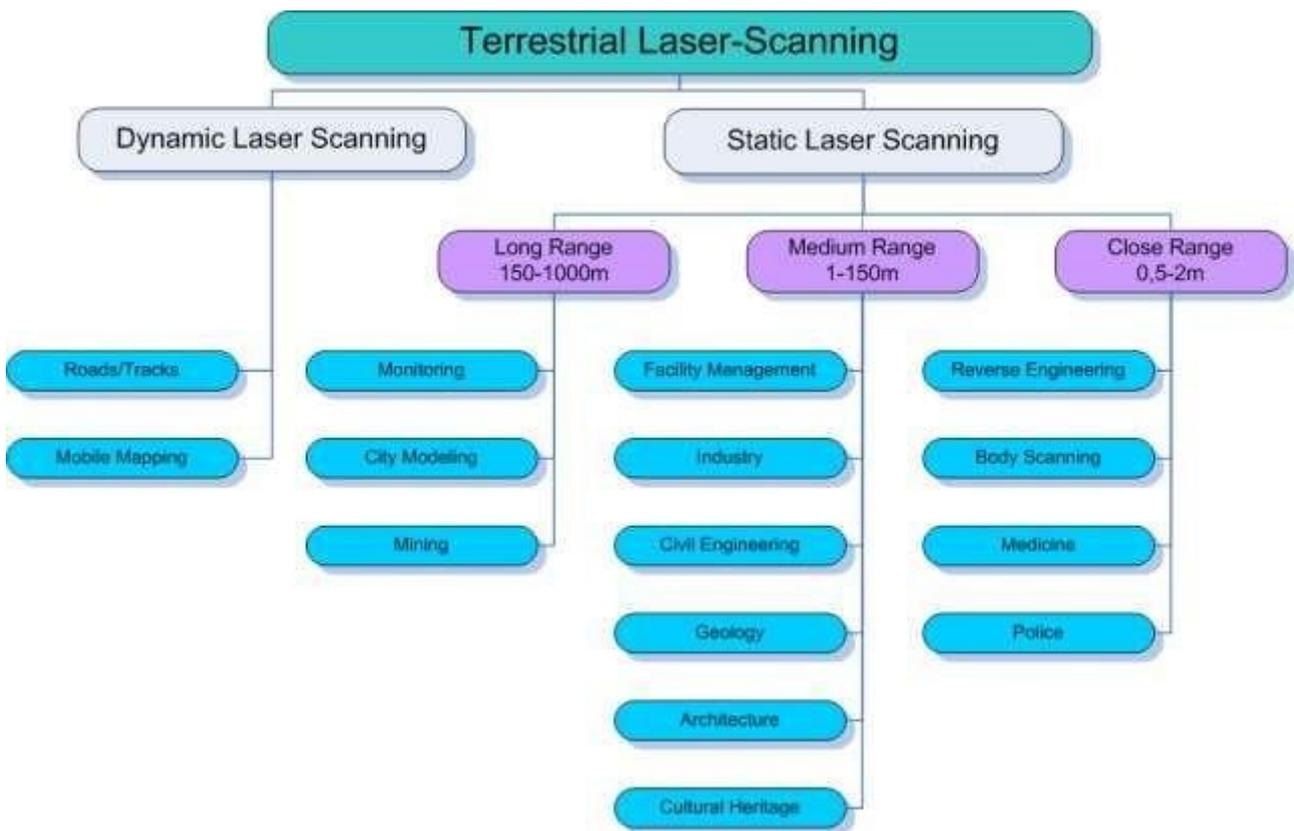
*Figura 2-Nuvola di punti*

La densità dei punti è proporzionale alle caratteristiche ed alla qualità dei diversi tipi di strumento che possiamo trovare in commercio, nello specifico nel numero di punti acquisiti al secondo, che possiamo trovare espressa sotto il nome di SCAN RATE o VELOCITÀ, e nel tempo di acquisizione, funzione dello spostamento con cui avviene il rilevamento, e quindi del mezzo su cui viene installato il laser scanner mobile.

## 2.1 Laser scanner mobile

Sul mercato esistono, come già espresso, diverse tipologie di laser scanner, ma possiamo dapprima considerare che le tecnologie in gioco si basano sempre sull'emissione e la ricezione di un raggio laser, di un fascio di luce oppure di un pattern luminoso; quindi concludere che i vari laser scanner si differenziano in base a principi operativi di funzionamento.

Una prima sostanziale differenza, che nel nostro studio è fondamentale conoscere, consiste nel fatto che tutti i laser scanner terrestri (Terrestrial Laser Scanner-TLS) si suddividono in laser scanner mobili (dynamic laser scanning) e in laser scanner statici (static laser scanning).



Da questa prima macro suddivisione è possibile riscontrare negli strumenti capacità e proprietà differenti, che riassumeremo in maniera semplice in questa tabella (Tab. 1).

Tab. 1- Laser scanner statico e mobile a confronto, caratteristiche principali

	✗	Peso	✓	
	✗	Grandezza	✓	
	✗	Tempo di acquisizione	✓	
	✗	Facilità di uso	✓	
	✗	Portabilità	✓	
	✗	Flessibilità	✓	
	✓✓	Precisione	✓	

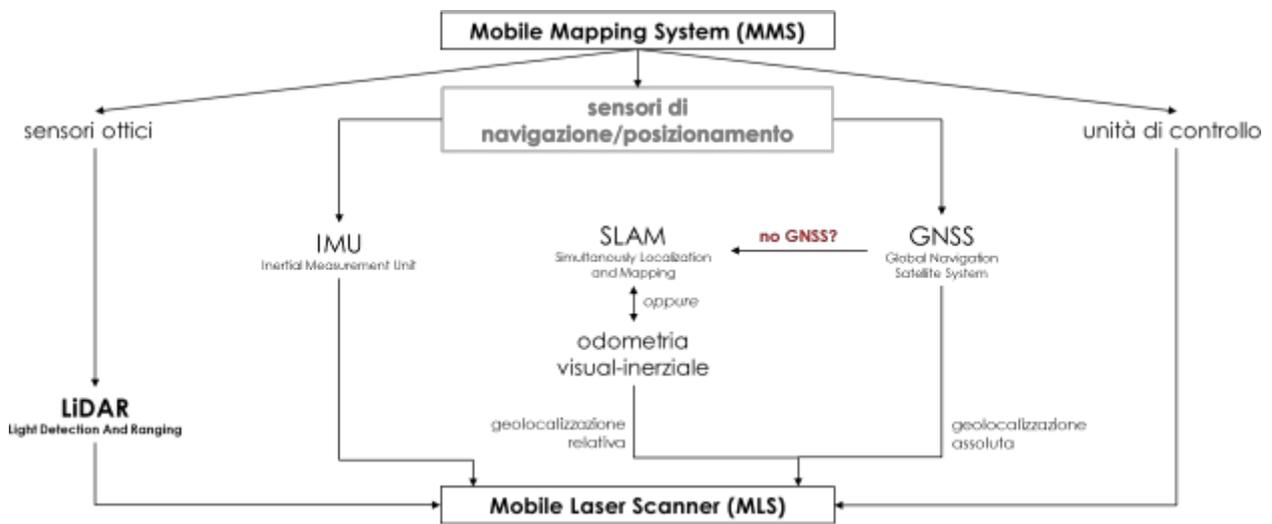
È possibile notare come la tecnologia mobile presenta una comodità di utilizzo maggiore a discapito di una precisione e accuratezza inferiore. Infatti se con strumenti statici è possibile avere una precisione dell'ordine del millimetro con strumenti mobili si riesce ad averla fino all'ordine del centimetro.

Un'altra sostanziale differenza, fra questi due macrogruppi, consiste nella presenza nei laser scanner dinamici di una *PIATTAFORMA D'APPOGGIO* che ne permette appunto l'utilizzo in movimento, al contrario i laser scanner statici che vengono installati su treppiedi.

A loro volta le tipologie di piattaforma differiscono permettendo all'operatore vari tipi di utilizzi e risultati di indagine.

Ad esempio con l'espressione Mobile Mapping System (MMS) si descrive una piattaforma mobile che può essere sia aerea che terrestre, nella quale sono integrati sistemi di misura e sensori per l'acquisizione di dati metrici georeferenziati. Quindi, MMS è un'integrazione di tre componenti hardware principali: sensori ottici, sensori di navigazione/posizionamento e un'unità di controllo. Questa tecnologia, se combinata con un'unità di rilevamento della luce e portata (LiDAR), può essere indicata come Mobile Laser Scanner (MLS) che è un acronimo ampiamente utilizzato nella letteratura recente. Questo approccio ha il grande vantaggio di essere efficiente

in termini di tempo rispetto agli altri metodi di indagine. In questo caso, i laser scanner sono stati posizionati su piattaforme mobili in modo da ottenere più posizioni di scansione con bersagli artificiali per alti tassi di rilevamento ed evitare, per quanto possibile, effetti d'ombra e aree di non rilevamento. È un ulteriore miglioramento della tecnologia che combina un sensore in movimento con la stima della posizione per ottenere una registrazione continua e angoli di visualizzazione illimitati. Per quanto riguarda la qualità dei dati ottenuti con i rilievi MLS, essa dipende dai dispositivi utilizzati ma generalmente raggiunge una precisione centimetrica e una risoluzione che è correlata alla velocità di acquisizione dei dati e alla distanza degli oggetti rilevati.



I MLS sono generalmente classificati in base alla piattaforma mobile utilizzata. Secondo la recente letteratura esaminata, le piattaforme mobili terrestri possono essere suddivise in: basate sulla persona fisica che tiene il dispositivo, su mezzi su ruote, su mezzi galleggianti e in casi particolari anche su slitte.

Con il termine "human-based" ci si riferisce a piattaforme trasportate da persone fisiche e, normalmente, sono indicate come Personal/Portable Laser Scanner (PLS) o Wearable Laser Scanner (WLS). Ci sono poche differenze tra PLS e WLS: il primo è solitamente riferito a sistemi che possono essere trasportati manualmente dall'operatore (come un laser scanner portatile) mentre il secondo solitamente indica piccoli dispositivi che possono essere indossati dall'operatore, come scanner in uno zaino. Le piattaforme "basate su ruote" possono essere indicate come carrelli, veicoli su rotaia, moto, bici e veicoli. Questi ultimi includono veicoli stradali, fuoristrada (ATV) e Unmanned Ground Vehicle (UGV). Molto spesso gli UGV coincidono con gli ATV, in

quanto vengono utilizzati dove le persone non possono accedere facilmente quindi un veicolo telecomandato (in letteratura può essere indicato semplicemente come “robot”) in grado di superare terreni difficili. Le piattaforme "basate su mezzi galleggianti" (boat-based) e "montate su slitte" sono utilizzate solo in determinati domini o condizioni, dove è necessario utilizzare tali tipi di piattaforme. A volte, l'acronimo "Boat Mobile Mapping System (BoMMS)" viene utilizzato per indicare i sistemi di mappatura mobile montati su imbarcazioni, indipendentemente dalle dimensioni dell'imbarcazione. Trattandosi di sistemi mobili aerei, in letteratura sono principalmente indicati come Airbone Laser Scanner (ALS), ma è possibile trovare anche “Aerial Laser Scanner” e “Aircraft Laser Scanner” e la principale differenza è dovuta alle unità laser equipaggiate, che hanno un range diverso nell'acquisizione dei dati. Anche in questo caso si trovano in letteratura gli acronimi UAV e UAS (rispettivamente Unmanned Aerial Vehicle e Unmanned Aircraft System) e sono entrambi riferiti ai sistemi ALS. Prima degli scanner installati su piattaforme mobili, i laser venivano utilizzati su piattaforme fisse e questi sistemi erano denominati Scanner Laser Terrestri (TLS), come già anticipato. L'innovazione tecnologica ha ampliato l'uso di tali unità laser stazionarie che, se abbinate a sistemi di localizzazione e mappatura, possono diventare unità laser mobili e in letteratura sono chiamate direttamente MLS o mobile-TLS. Come accennato in precedenza, un tipico sistema MLS ha la capacità di localizzarsi e mapparsi grazie sia al ricevitore Global Navigation Satellite System (GNSS) che all'Inertial Measurement Unit (IMU), che sono sensori che verranno spiegati meglio nel prossimo paragrafo di questa Tesi.

Concludiamo affermando che i laser scanner mobili (MLS) oltre a presentare una grande facilità di utilizzo affiancata da una rapida velocità di acquisizione dati, possiedono anche la potenzialità di essere applicati in vari contesti anche complessi, impervi e ostili.

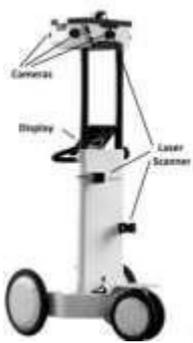


Hand-held



Piattaforme “human-based”

Backpack



Trolley



Veicolo su strada

Piattaforme "basate su ruote"



Piattaforme "boat-based"



Aerial Laser Scanner

### 2.1.1 Sistemi di navigazione

È inoltre possibile sfruttare la tecnologia laser scanner mobile implementandola con altre tecnologie.

Ad esempio, negli strumenti con tecnologia SLAM (Simultaneously Localization And Mapping) vi è la combinazione di dati laser scanner con dati di navigazione, con il fine, sempre, di creare nuvole di punti.

La localizzazione e mappatura simultanea (Simultaneously Localization and Mapping-SLAM) è il problema computazionale della costruzione o dell'aggiornamento di una mappa di un ambiente sconosciuto, tenendo contemporaneamente traccia della posizione di un agente al suo interno. Nonostante possa sembrare una tecnologia molto complessa, sono noti diversi algoritmi per risolverlo, almeno approssimativamente, in tempi trattabili per determinati ambienti, permettendo una rapida acquisizione e mappatura. Gli algoritmi SLAM sono adattati alle risorse disponibili, quindi non mirati alla perfezione, ma alla conformità operativa e alla facilità di utilizzo ultima.

Invece, negli strumenti basati su una tecnologia *ODOMETRICA VISUAL-INERZIALE* è basata sulla predizione della tecnologia IMU (Inertial Measurement Unit) che può misurare sia le accelerazioni lineari (accelerometro a tre assi) che le velocità di rotazione (giroscopio a tre assi), che possono essere integrate numericamente per fornire la posizione tridimensionale e l'orientamento di un oggetto. In combinazione con i dati di posizione, IMU permette di trasformare i dati puntuali ottenuti dal frame locale MLS nel sistema ground-centric-ground-fixed. Quindi, tutti i punti sono proiettati in un quadro comune e qualsiasi errore non compensato dall'IMU avrà un effetto diretto sulla qualità geometrica della nuvola di punti.

La combinazione tra il sistema di navigazione IMU e SLAM ridurrà con successo la deriva della navigazione ogni volta che il segnale GNSS non è chiaro e fornirà informazioni di navigazione assolute, che non sono fornite dagli algoritmi SLAM o dalla tecnologia odometrica visual-inerziale (Fig. 3).

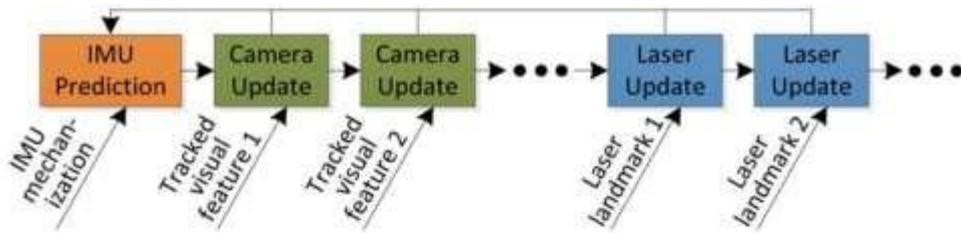
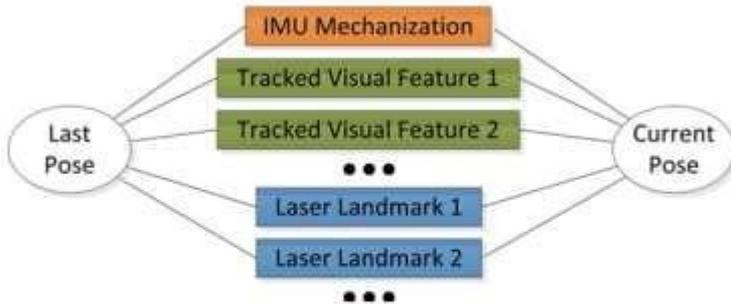
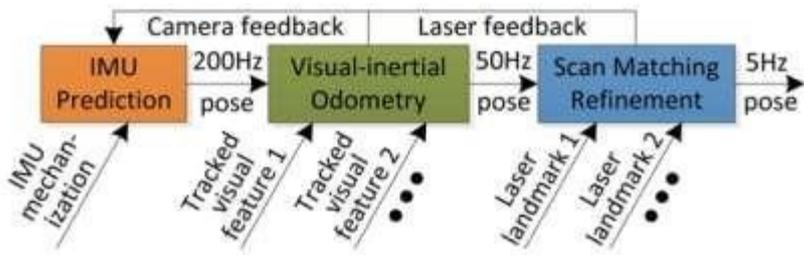


Figura 3-Concetto base del sistema di navigazione in assenza di GNSS



Algoritmo SLAM



Odometria visual inerziale

### 3 STRUMENTI

La scelta dello strumento da utilizzare viene fatta in base alle esigenze di rilevamento, infatti le diverse tipologie di laser scanner presentano differenze nella risoluzione della nuvola di punti. Nel panorama attuale non vi è nessuno strumento in grado di soddisfare contemporaneamente tutte le esigenze che si possono riscontrare nella tecnica del rilievo tridimensionale, perciò la scelta deve essere fatta in base alle esigenze specifiche di utilizzo, come:

- *Accuratezza,*  
Grado di conformità di una quantità misurata rispetto al valore reale, varia da valori di accuratezza millimetrici a centimetrici, i laser scanner si basano su due principi distinti, l'accuratezza angolare e l'accuratezza nella misura delle distanze. In generale essa può essere influenzata negativamente dalla temperatura, dalle condizioni atmosferiche, da interferenze luminose e da possibili campi elettromagnetici;
- *Velocità di acquisizione,*  
La velocità con si acquisiscono i dati, si misura in numero di punti al secondo (punti/sec), essa rappresenta una caratteristica molto rilevante per quanto concerne la produttività del rilievo, infatti la durata di ogni singola scansione può durare da alcuni secondi ad alcune decine di minuti. Ciò dipende dal campo visivo di acquisizione, dal passo angolare, dal principio di misura del range (tempo di volo, differenziazione di fase, triangolazione), dalla distanza dell'oggetto, dalla velocità dei sistemi meccanico-ottici di puntamento e deflessione.
- *Range di misura,*  
La distanza massima a cui il sensore può effettuare la misura, viene misurata in metri, essa ricopre un importante ruolo nella scelta del tipo di strumento da utilizzare. Le portate dei laser scanner in commercio vanno attualmente da alcune decine di centimetri ad alcune centinaia di metri. In tutti i casi, all'aumentare della portata corrisponde una diminuzione della risoluzione d'acquisizione, ciò comporta che per scansioni a lunga distanza si può arrivare ad avere fino a risoluzioni decimetriche.
- Lunghezza d'onda in base alle possibili sorgenti di rumore esterno (luce solare, umidità) e delle caratteristiche di riflettività delle superfici esterne,

- *Campo visivo dello strumento,*

In commercio si possono trovare tipologie di scanner, che dal punto di vista del campo visivo di acquisizione, possono essere raggruppati in tre categorie principali: i *camera scanner*, i *panorama scanner* e gli *scanner ibridi* che adottano una soluzione intermedia (Fig. 4),



Figura 4-Camera scanner, Panorama scanner, Scanner ibridi

- *Dotazione di camere digitali interne od esterne,*

La fotocamera può essere interna allo scanner, esterna ma integrata al sistema laser scanner, oppure può essere una fotocamera esterna adoperata direttamente dall'operatore;

- *Facilità di trasporto,*

La praticità e la semplicità di trasporto dello strumento dono dei fattori determinanti nel caso si debbano realizzare scansioni di zone difficilmente raggiungibili con adeguati mezzi di trasporto;

- *Qualità del software d'acquisizione,*

L'utilizzo dello strumento ha bisogno di un'interfaccia installata su PC. La sua qualità si può valutare considerando le caratteristiche d'intuitività dell'interfaccia grafica e della scelta delle funzioni, nonché dalla serie di controlli che permette di effettuare sull'hardware.

Per quanto concerne lo sviluppo dell'elaborato di tale Tesi sono stati messi a confronto due strumentazioni MLS (Mobile Laser Scanner), **GeoSLAM ZEB Horizon** (Fig. 5) e **KAARTA Stencil 2-16** (Fig. 6).



Figura 5-GeoSLAM ZEB Horizon



Figura 6-KAARTA Stencil 2-16

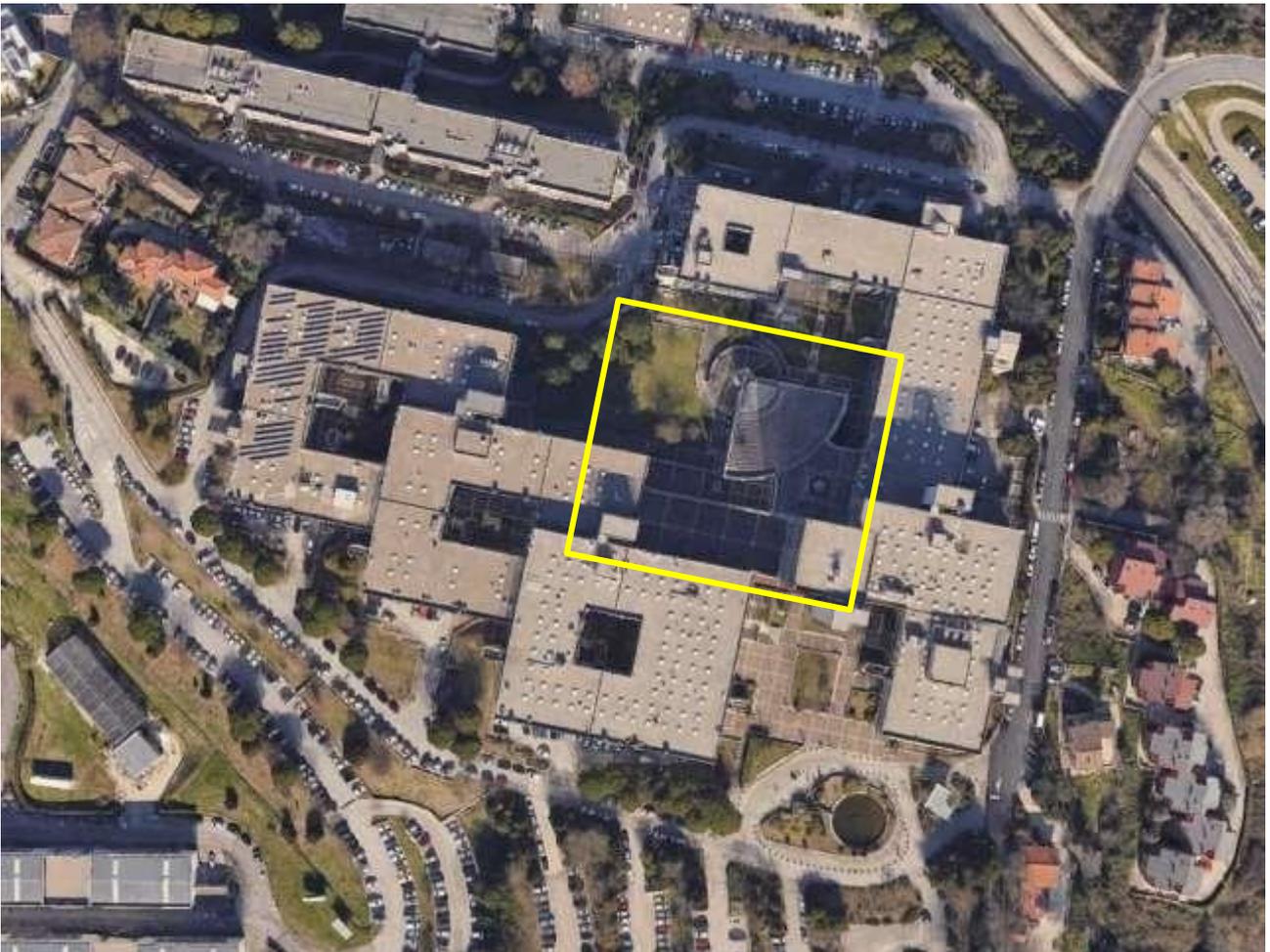
Scopriamone le specifiche tecniche attraverso la seguente tabella (Tab.2).

Tabella 2- Dispositivi MLS utilizzati a confronto

	<b>GeoSLAM ZEB Horizon</b>	<b>KAARTA Stencil 2-16</b>
<b>IMU</b>	MEMS	Intel NUC 7i7 Quad Core (MEMS)
Processing	Post processing	Real time processing
<b>LIDAR</b>		
Unità laser	Velodyne VPL 16	Velodyne VPL 16
Accuratezza	±30mm	±30mm
Velocità	300.000 punti/sec	300.000 punti/sec
Campo visivo (FOV – Field of view)	360° orizzontale 270° verticale	360° orizzontale 30° verticale
Misurazione della distanza	Tempo di volo-TOF	Tempo di volo-TOF
Range	100m	100m
<b>SISTEMA DI NAVIGAZIONE</b>	SLAM	Odometria visual-inerziale
Sistema di tracciamento	ZEB CAM	FEATURE TRACKER
Risoluzione (camera)	3820 x 2160	640 x 360
<b>PIATTAFORME DI APPOGGIO</b>	<b>Asta telescopica</b>	<b>Asta telescopica, veicolo, drone</b>
<b>CARATTERISTICHE FISICHE</b>		
Peso	3700g	1730g
Temperatura per rilievo	0°C [min] – 50°C [max]	0°C [min] – 50°C [max]

## 4 CASO STUDIO

Come caso studio si è scelto di eseguire questo test in un'area esterna della Facoltà di Ingegneria di Ancona (UNIVPM) (Fig. 7).



*Figura 7- Individuazione dell'area del test*

Da come si può vedere dall'immagine l'area in esame corrisponde a quella delineata dalla linea gialla. Essa rappresenta una piccola porzione esterna di tutto l'edificio, dove si erige la torre principale di ben otto piani, una sorta di teatro che copre una modesta area a forma di quarto di area di circonferenza, il quale dalla quota più bassa della torre scende fino al vertice di questo grande spicchio.

All'interno del teatro proprio in prossimità del vertice è presente una scala a chiocciola non visibile dall'esterno che dalla parte superiore, dove sono presenti i

gradoni dell'anfiteatro, porta ad un piccolo spazio verde nel quale è presente anche della vegetazione arborea.

La posizione insieme alle costruzioni appena descritte, presentano diversi tipi di materiali, i quali vengono rilevati e studiati dagli strumenti in esame. Per quanto riguarda le superfici verticali possiamo notare soprattutto la presenza di parti in calcestruzzo armato, materiale principale con il quale è costruita la struttura, e parti metalliche e vetrose dovute invece alla presenza di finestre, porte e vetrate. Per quanto riguarda invece le superfici orizzontali, nella pavimentazione e lungo le scale, si può notare la presenza di materiale lapideo per rivestimento da esterno. Inoltre vi è anche, come già accennato, la presenza di vegetazione nelle aiuole e nella zona inferiore dove è presente un piccolo spazio verde.

## 5 FASE DI ACQUISIZIONE

Come prima cosa è stato condotto un sopralluogo per verificare che vi fossero tutte le condizioni necessarie al fine di poter condurre tale confronto.

Gli aspetti da tener conto e quindi controllare in un sopralluogo sono:

- l'accessibilità del sito nei termini e nelle condizioni in cui poi si vuole condurre lo studio. Nel nostro caso, ad esempio, la possibilità di poter raggiungere e percorrere il luogo a piedi potendo sostenere un'asta telescopica, e di conseguenza la presenza o meno di ostacoli e quindi la sicurezza del luogo stesso.
- la luminosità degli ambienti, legata anche alla presenza o meno di spazi chiusi, aspetto che interagisce in maniera differente con i vari strumenti e con le diverse specifiche tecniche, il quale poi ci permette di progettare il miglior percorso per poter avere qualità elevate nel rilevamento ed evitare che ci sia una perdita dell'orientamento da parte dello strumento utilizzato.
- Un altro aspetto importante su cui porre attenzione è la possibilità di poter compiere o meno percorsi chiusi durante il rilevamento, ovvero percorsi in cui il punto iniziale e finale coincidono in modo tale da poter rilevare punti comune che permettono di poter allineare tutta la nuvola. Inoltre tale aspetto permette di poter spegnere lo strumento senza inficiare sulla qualità del risultato e poter spostarsi ad effettuare altri rilevamenti, anche distanti. Quindi permettere di limitare il tempo di acquisizione e consentire di elaborare più velocemente i dati acquisiti.
- localizzare le posizioni più adatte per poter rilevare i punti GPS (Global Positioning System-Sistema di posizionamento), ovvero controllare la presenza o meno di vegetazione arborea ad alto fusto e chioma folta, torri, palazzine, edifici snelli ed alti, ed ancora luoghi stretti e con poca apertura celeste.

Possiamo concludere che la fase d'ispezione che avviene in un sopralluogo è molto importante in quanto essa ci suggerisce le metodologie e le strumentazioni migliori per il contesto in cui dobbiamo lavorare.

## 5.1 Rilievo GNSS

É stato fatto un rilievo GPS con il sistema GNSS HiPer V TopCon (sistema rover) e sono stati rilevati cinque punti per georeferenziare le nuvole di punti acquisite.

Qui sotto è riportata un'immagine con vista dall'alto della posizione dei punti (Fig. 8).

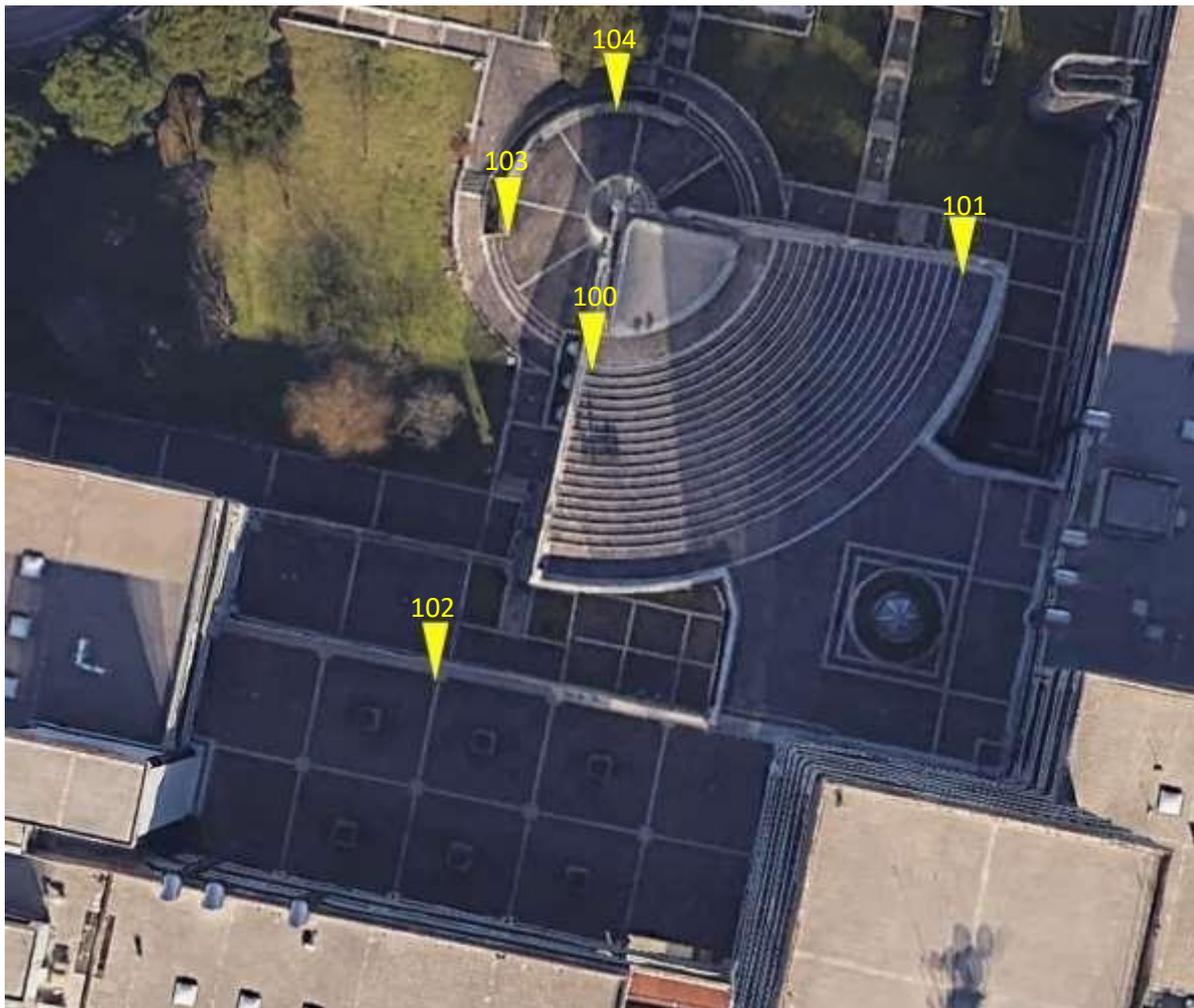


Figura 8-Facoltà d'Ingegneria, UNIVPM

Coordinate GPS dei punti evidenziati nell'immagine, sistema di riferimento WGS84-UTM33N (Tab. 3):

Tabella 3- Punti GPS e relative coordinate

ID	x	y	z
100	380226.999	4827099.905	151.095

101	380256.319	4827106.502	154.313
102	380215.837	4827074.966	154.706
103	380220.539	4827111.733	144.306
104	380225.190	4827120.348	144.385

## 5.2 Rilievi con MLS

Per quanto riguarda invece i rilievi eseguiti con gli strumenti MLS, sono stati eseguiti percorsi chiusi, a piedi e con gli strumenti sorretti a mano mediante un'asta telescopica da parte dell'operatore. Dapprima con uno e successivamente con l'altro.

Nelle immagini che seguono sono riportati le traiettorie percorse con gli strumenti, nello specifico in blu quella eseguita con GeoSLAM ZEB Horizon (Fig. 9) ed in rosso quella eseguita con KAARTA Stencil 2-16 (Fig. 10).

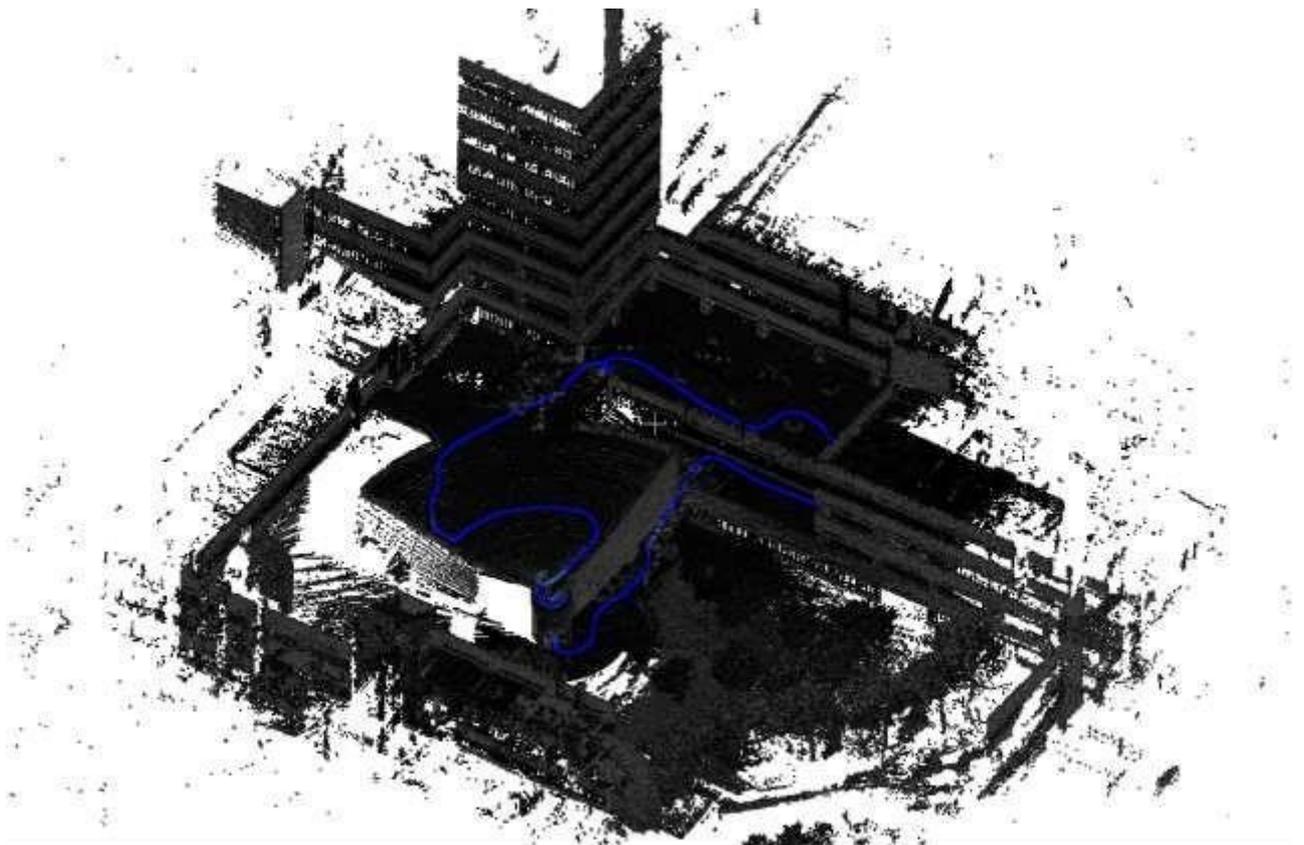


Figura 9- Traiettoria eseguita con il MLS GEOSLAM Zeb Horizon

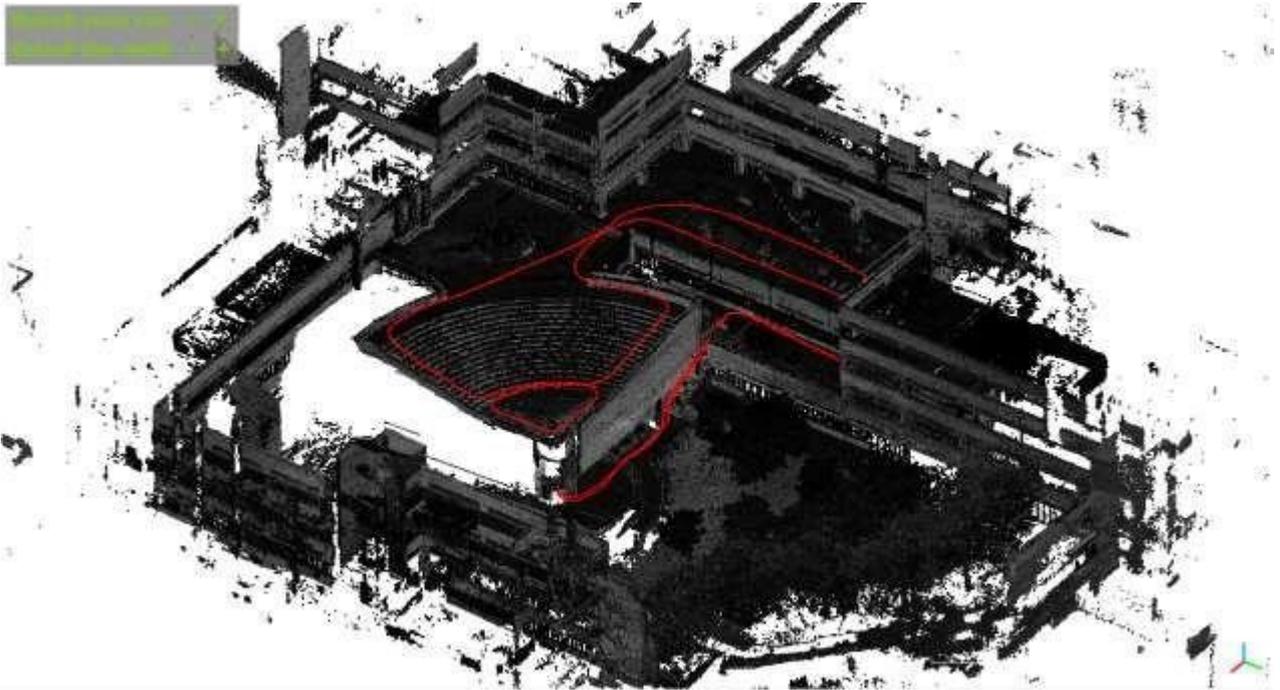


Figura 10- Traiettoria eseguita con il MLS KAARTA Stencil 2-16

Durante lo svolgimento della prova sono emerse delle criticità.

Come si evince anche dalle immagini la traiettoria eseguita con il KAARTA Stencil 2-16 è stata allungata e diversificata a causa della perdita dell'orientamento da parte dello strumento all'interno la tromba delle scale a chiocciola, dovuto alla scarsa luminosità del luogo. Questo ha portato ad una prima differenza in qualità di densità dei punti delle nuvole di punti acquisite come riporta la seguente tabella (Tab. 4)

Tabella 4- Numero punti acquisiti durante i rilievi eseguiti con i due diversi MLS

MLS	GeoSLAM Zeb Horizon	KAARTA Stencil 2-16
N. punti	30.554.355	68.640.306

## 6 FASE DI ELABORAZIONE

In questa fase passiamo dall'utilizzo della componente hardware, rappresentata dalla strumentazione tecnica utilizzata, descritta nel precedente capitolo, all'utilizzo della componente software utilizzata in questo studio. Tale componente è rappresentata dal programma *CloudCompare* (Fig. 11).

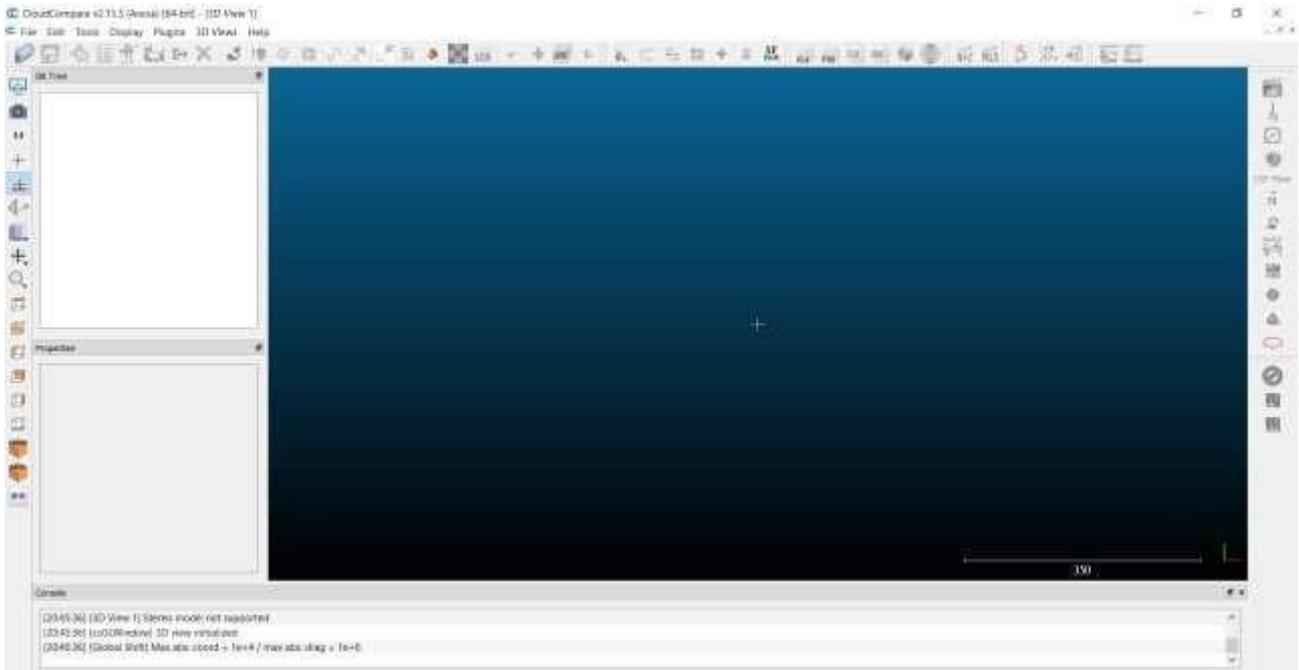


Figura 11-Schermata di lavoro di CloudCompare

Tale software serve per elaborare e gestire le nuvole di punti rilevati dagli strumenti. In commercio possiamo trovare la presenza di diversi programmi capaci di poter adempiere a questi scopi, ma la scelta è ricaduta su *CloudCompare* in quanto esso presenta diverse caratteristiche congeniali allo studio, come il fatto che sia un software *opensource*, non presenta nessun tipo di licenza, è gratuito e si può installare sul qualsiasi tipo di pc o computer e qualsiasi sistema operativo.

## 6.1 Registrazione della nuvola di punti

Al termine del rilievo, i dati acquisiti con gli strumenti laser scanner vengono salvati nell'unità di memoria e da qui la possibilità di estrarli salvandoli su una memoria esterna grazie alle porte USB presenti nei due dispositivi laser scanner utilizzati.

Per quanto riguarda il MLS GEOSLAM Zeb Horizon, i dati del rilievo vengono salvati in un file di formato *.geoslam*. Da qui la necessità di elaborare tale file in un software dedicato offerto dalla casa produttrice, chiamato GEOSLAM Hub (versione 6.1) (Fig. 12). Il file *.geoslam* viene quindi caricato all'interno di questo software e da qui in automatico parte il processamento dei dati e quindi la generazione e la registrazione della nuvola di punti. In questo caso si parla di *post-processing*, ovvero che il processamento dei dati avviene a seguito del rilievo.

Una volta ottenuta la nuvola di punti, essa può essere esportata in vari formati di nuvole di punti (*.xyz*, *.txt.*, *.ply*, *.las*) potendo poi spostare il lavoro su CloudCompare.

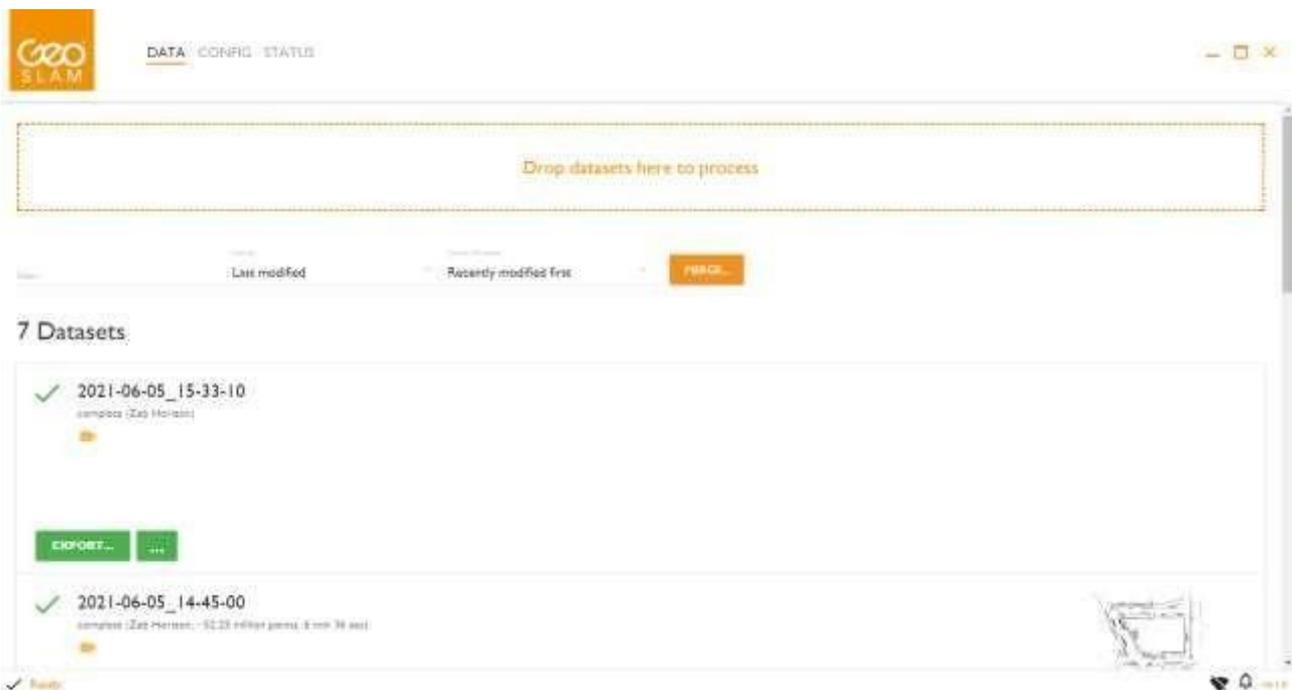


Figura 12-Schermata di lavoro di GEOSLAM Hub

Al contrario, eseguendo un rilievo con il MLS KAARTA Stencil 2-16, l'elaborazione della nuvola di punti avviene in tempo reale (*real-time processing*) e la registrazione si esegue in automatico al termine del rilievo stesso. Quindi, quando il lavoro si sposta in laboratorio, si può subito scaricare i dati già registrati in una memoria esterna per poi procedere alla gestione della nuvola di punti sul software CloudCompare.

In entrambi i casi, oltre al file relativo alla nuvola di punti 3D, vengono ottenuti anche file relativi alla nuvola di punti e immagini della traiettoria del percorso effettuato in fase di acquisizione e altri file contenenti caratteristiche del rilievo eseguito, come lunghezza del percorso effettuato, tempo impiegato e numero di punti totali sia della nuvola di punti che della traiettoria. Un esempio viene mostrato di seguito che mostra tali parametri in un file .txt generato dal KAARTA (Fig. 13).

```
Scan Info:
          YAML filename : /2021-03-15-08-36-01/scan_info_2021-03-15-08-36-01.yaml
          Launch Mode : Mapping without Camera
          PLY Time Offset : 1615811761

-----

Time Stats:
          Start Time : 2021-03-15-08-36-01
          Stop Time : 2021-03-15-08-43-34
          Scan Time (h:m:s) : 00:07:31

-----

Pointcloud Stats:
          Average Confidence : 219,777
          Number of Points : 68,640,306
          Trajectory Length : 456.9 m
          Trajectory Points : 3292
          Last XYZYPR Pose : 0.092 -0.097 -0.102 0.053 -0.058 -0.058
          Processing Rate (hz) : 10hz
```

Figura 13-Dati relativi alla scansione eseguita con il KAARTA Stencil 2-16: nome del file, tempo impiegato per il rilievo, dati statistici della nuvola di punti.

## 6.2 Georeferenziazione della nuvola di punti

Una volta completate le operazioni di registrazione delle nuvole di punti, il primo passo è stato quello di georeferenziarle. Si è proceduto con un allineamento di tipo manuale tramite CloudCompre.

Grazie ad un comando presente nel software, sono stati inseriti i punti GPS in un'apposita tabella con le relative coordinate, poi tali punti vengono individuati nelle nuvole di punti di entrambi i rilievi eseguiti. Tale corrispondenza viene poi monitorata con la variazione del valore di errore (RMS: root mean square).

Qui di seguito vengono riportati i risultati dell'allineamento eseguito per le due nuvole di punti (Figg. 14 e 15). Si può notare come il valore del RMS finale è molto basso dell'ordine di 3-4 cm confermando un'ottima precisione della georeferenziazione stessa, considerato il grado di accuratezza garantita dagli strumenti.

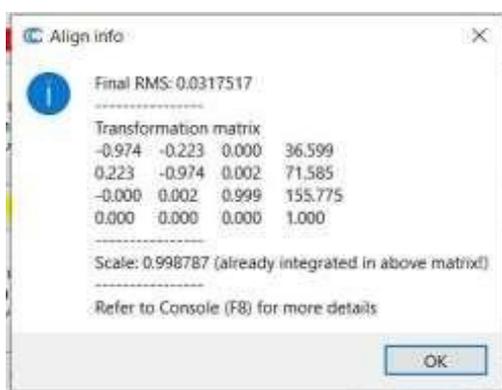
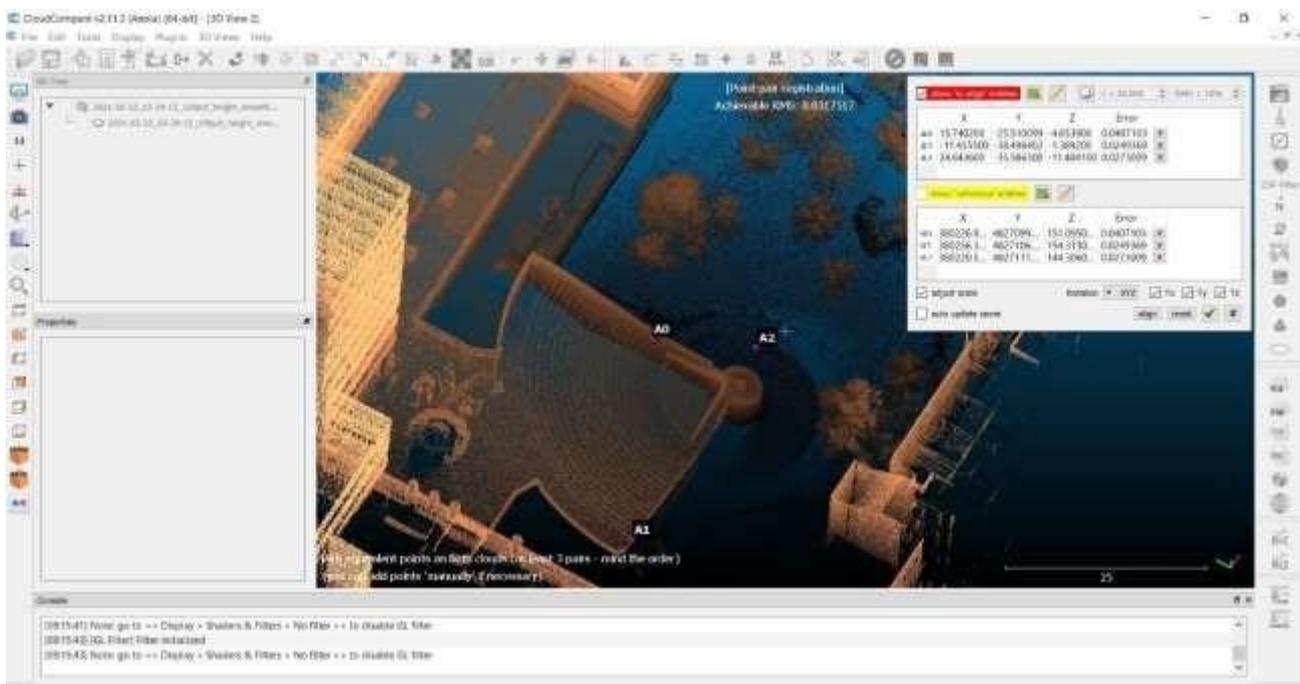


Figura 14- Risultati della georeferenziazione della nuvola di punti generata dal GEOSLAM Zeb Horizon e valore del RMS finale.

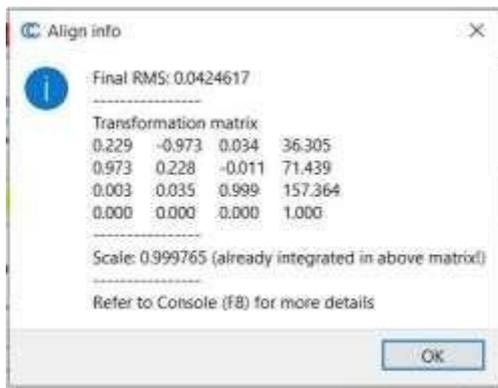
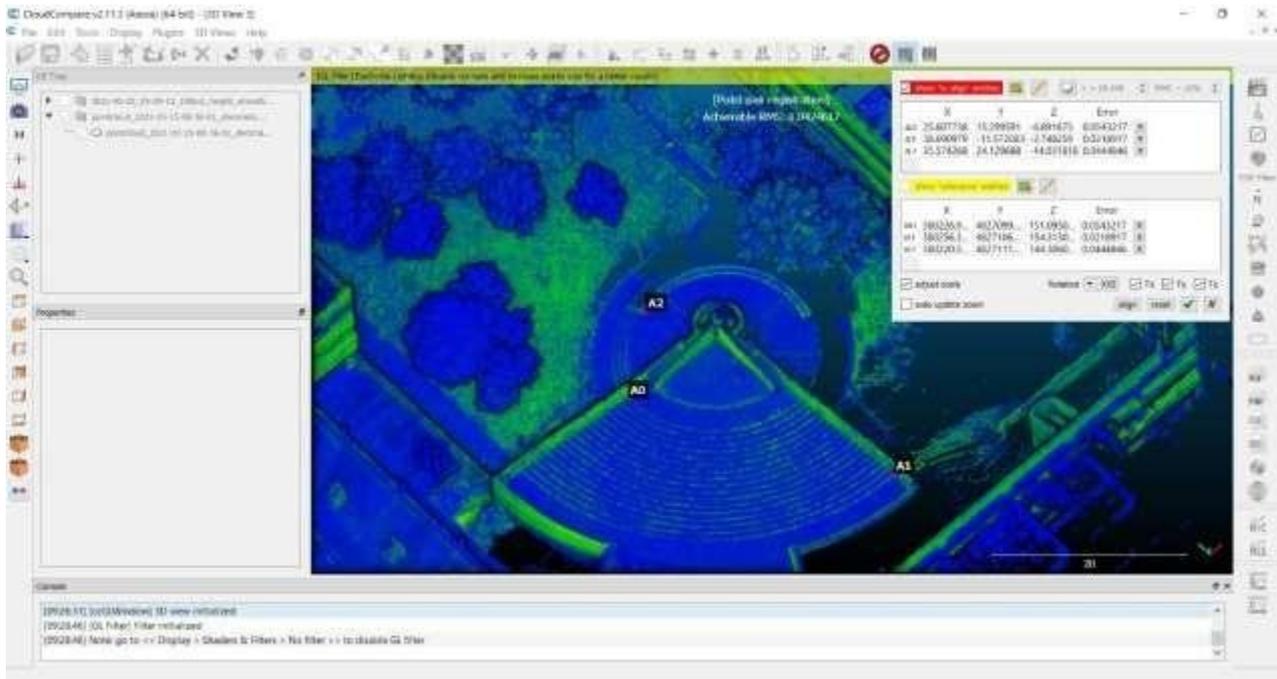


Figura 15- Risultati della georeferenziazione della nuvola di punti generata dal KAARTA Stencil 2-16 e valore del RMS finale.



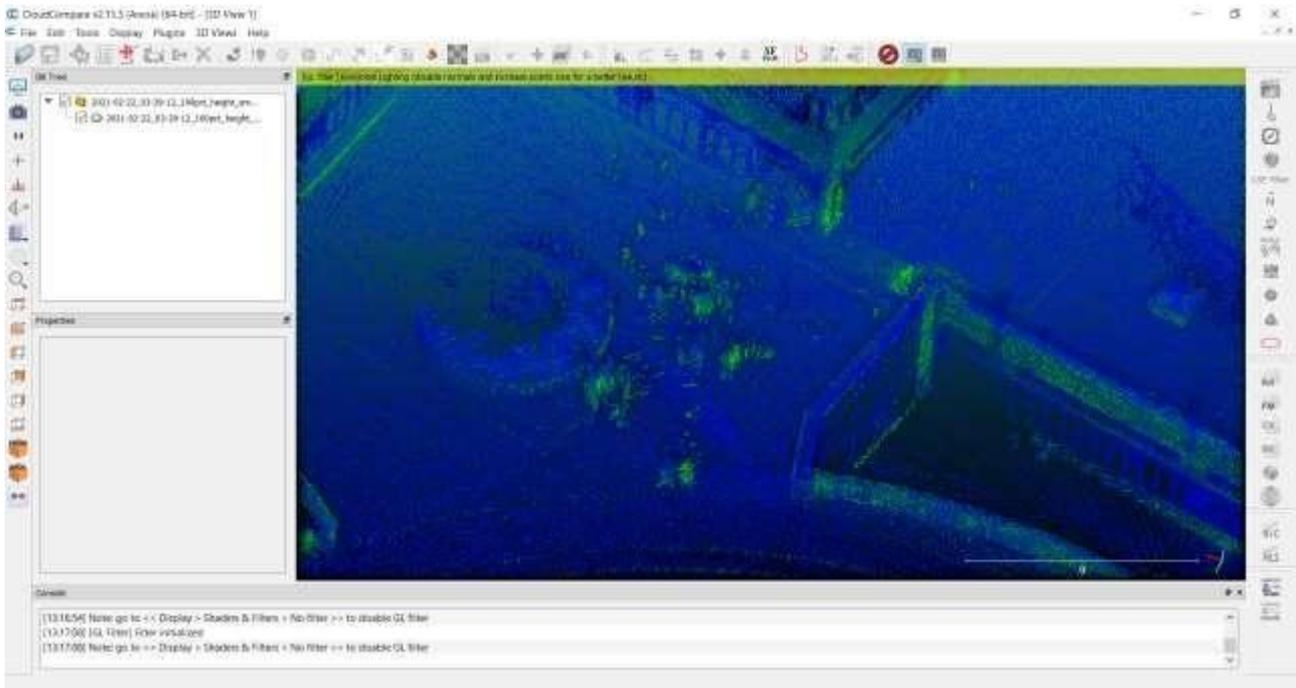


Figura 17- Dettaglio della nuvola di punti che registra la presenza di persone che rappresenta una forma di rumore.

Una volta rimosse queste fonti di rumore, è stato eseguito un filtraggio per la rimozione di punti sparsi all'interno dell'area d'interesse. Questo è stato fatto in automatico sulla base dei parametri di default suggeriti dal software CloudCompare attraverso il comando "noise filter".

A causa del grande spazio in memoria e il peso del file da elaborare, entrambe le nuvole di punti sono state decimate di 10 cm per poter alleggerire i files di lavoro.

I punti totali di entrambe le nuvole di punti sono riportati di seguito:

MLS	GeoSLAM Zeb Horizon	KAARTA Stencil 2-16
n. punti	598.245	999.859

## 7 ANALISI DELLE NUVOLE DI PUNTI

Per verificare l'accuratezza delle nuvole di punti abbiamo scelto quella rilevata con il KAARTA Stencil 2-16 di considerarla come nuvola di punti di riferimento (*ground truth*), mentre come nuvola di punti di confronto quella rilevata dal GeoSLAM ZEB Horizon.

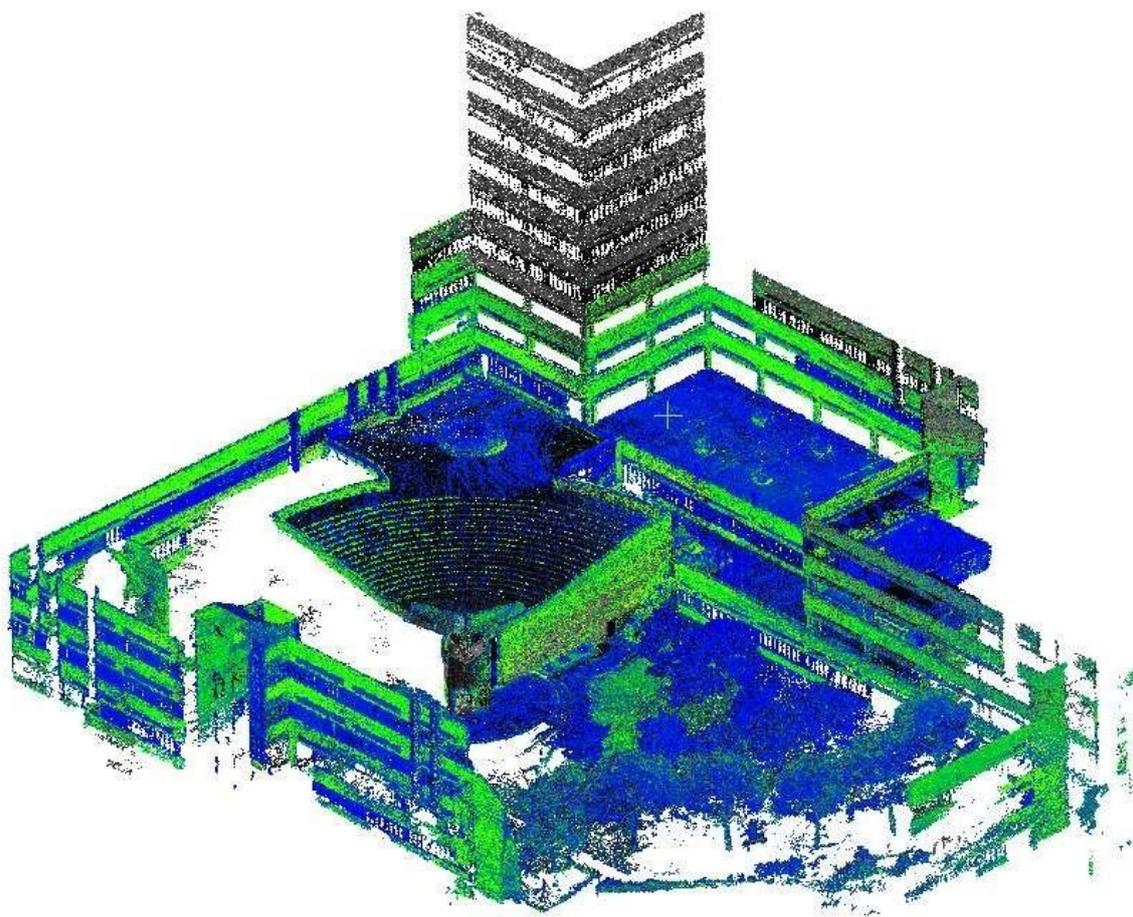


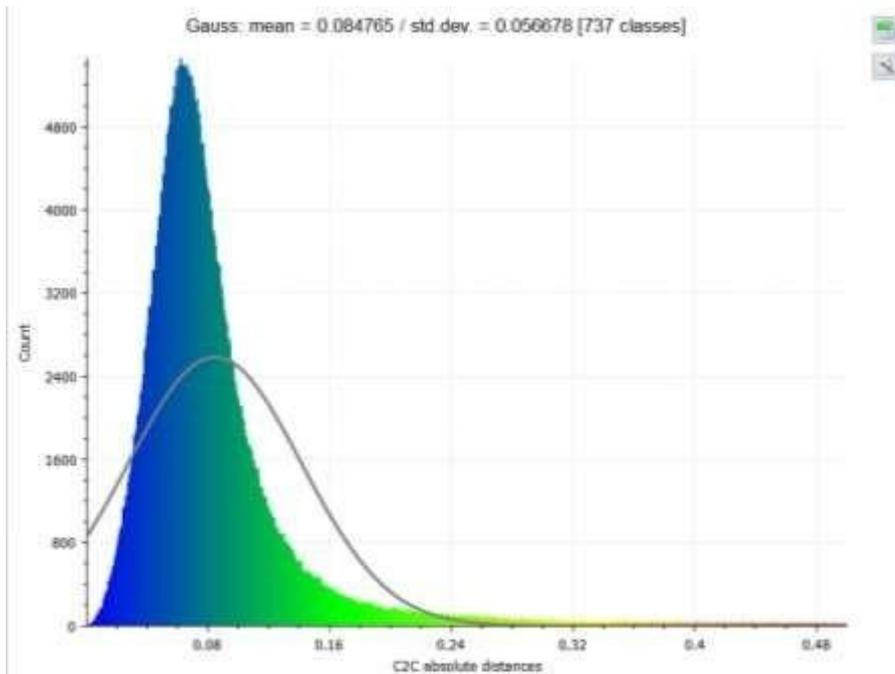
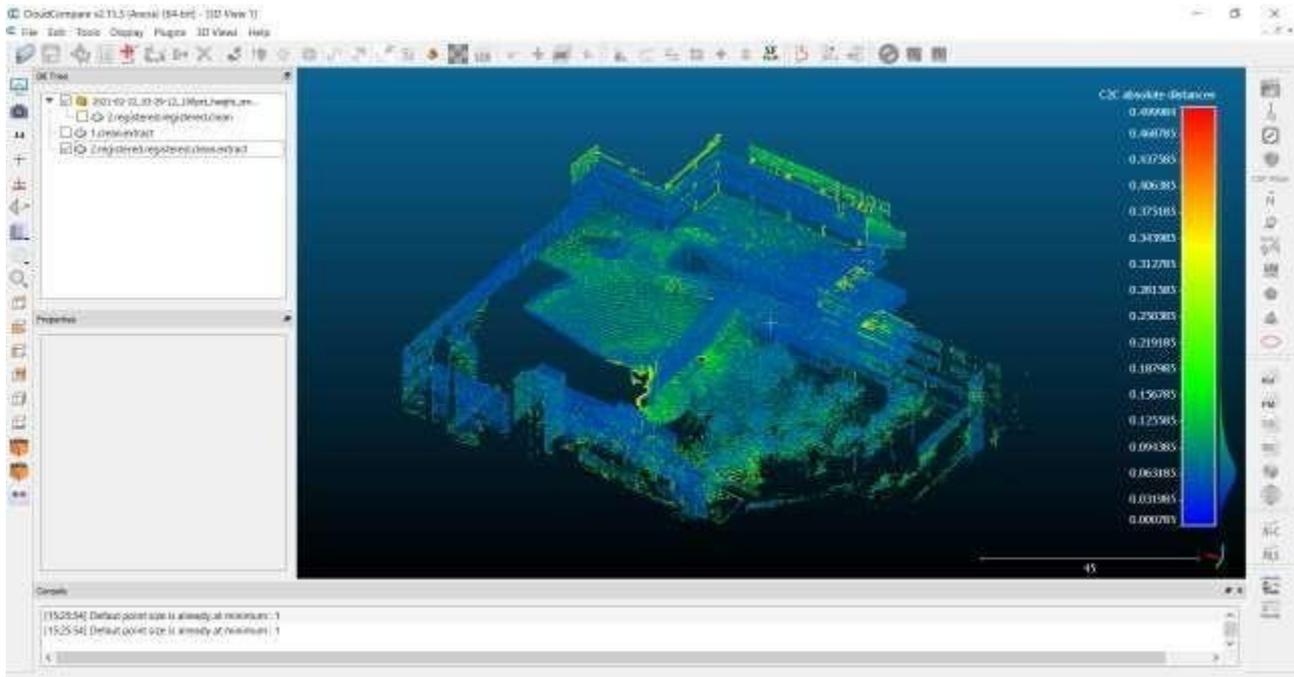
Figura 18- Rappresentazione delle due nuvole di punti: quella in scala di intensità (blu-verde) è la nuvola di punti generata dal KAARTA, quella in scala di grigi quella ottenuta dal GeoSLAM.

## 7.1 Confronto e verifica dell'accuratezza

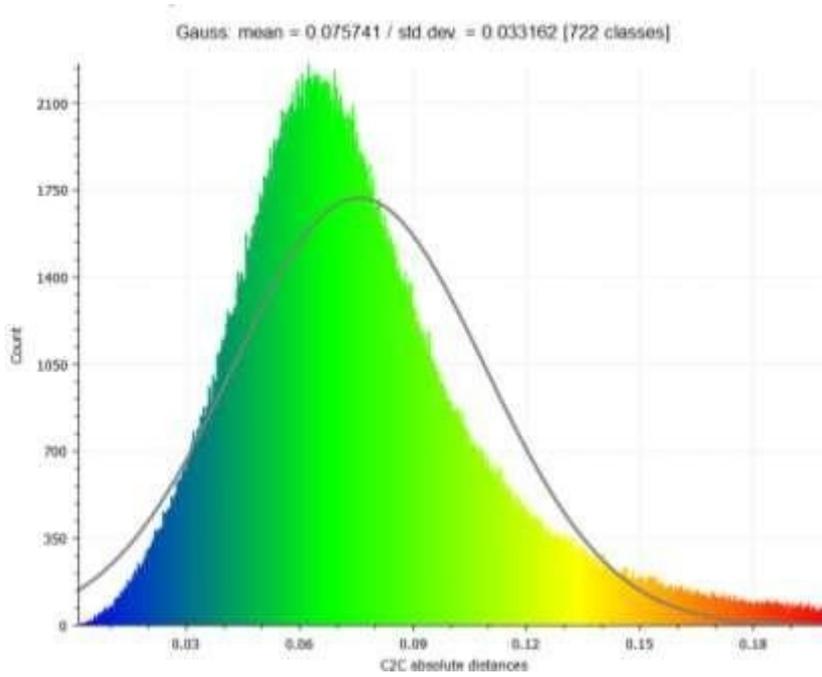
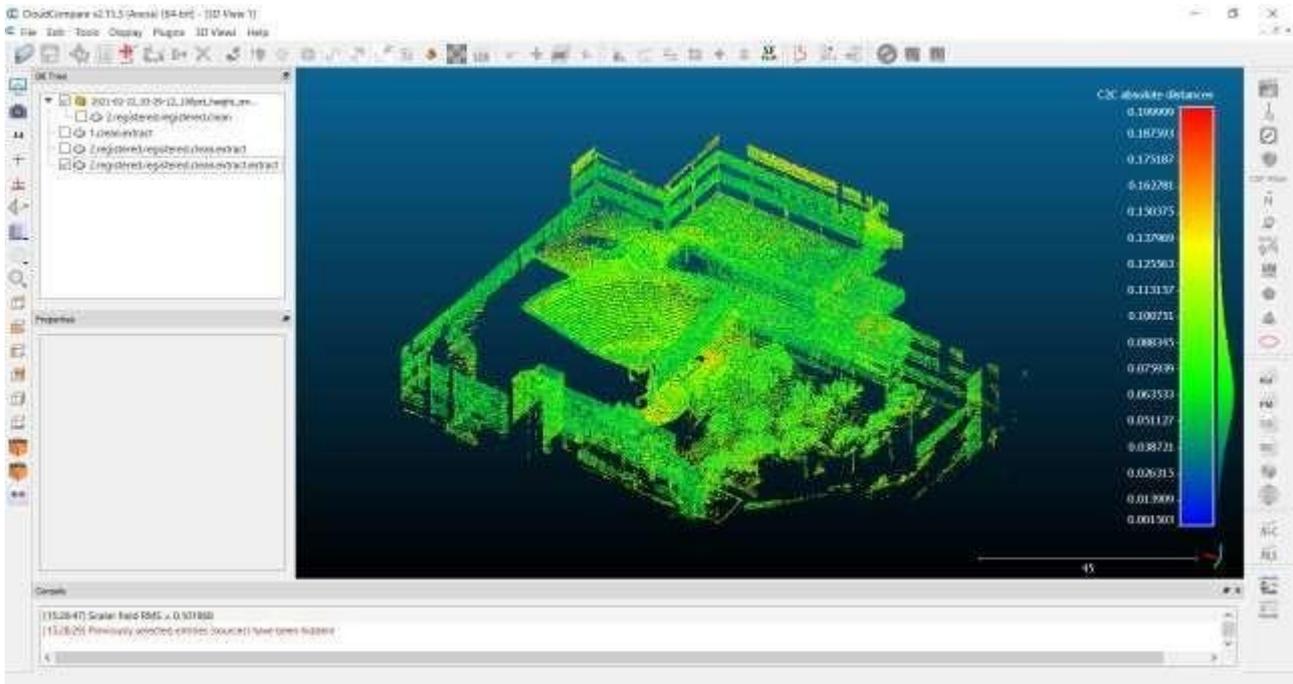
Si è proceduto all'interno del software CloudCompare selezionando entrambe le nuvole di punti, opzionando tra i TOOLS nel comando DISTANCE, l'operazione CLOSEST POINTS SET. Come file di output abbiamo ottenuto una nuova nuvola di punti del GeoSLAM "ridotta" a quella del KAARTA in modo da avere una distribuzione dei punti in maniera equa e basata sulla presenza di punti corrispondenti tra le due nuvole di punti su cui calcolare la loro distanza.

Selezionando nuovamente quest'ultima nuvola di punti ottenuta e quella iniziale del KAARTA, si è proceduto nuovamente opzionando tra i TOOLS nel comando DISTANCE, l'operazione CLOUD TO CLOUD (C2C). Di nuovo si è proceduto alla comparazione di queste due nuvole di punti, avendo però ora come nuvola di riferimento quella del GeoSLAM "ridotta" e confermando il comando. Come file di output in questo caso si è ottenuta una nuova nuvola di punti con la quale poi si è operata la comparazione alle varie distanze scelte per lo studio:

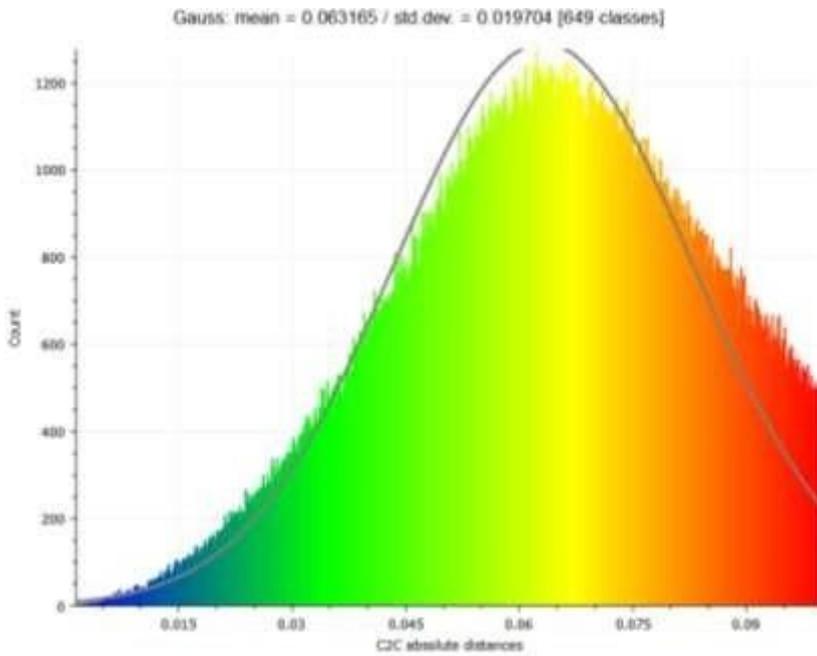
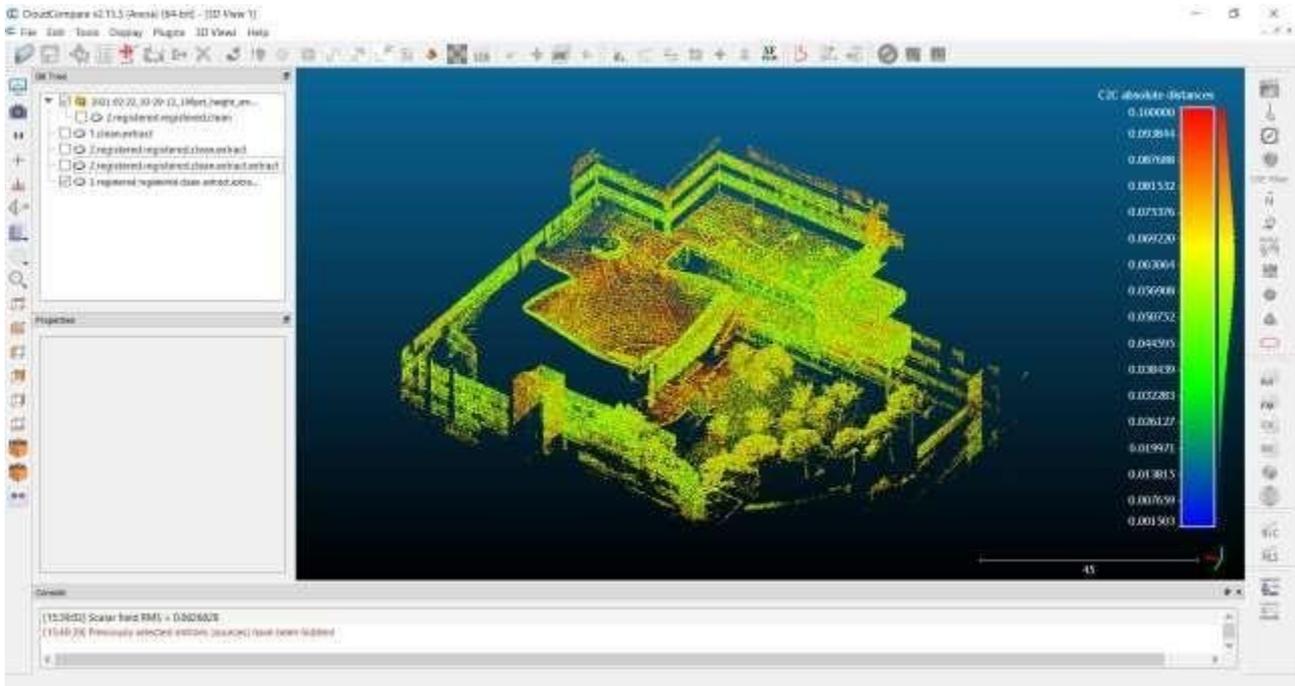
- Soglia 0.00 cm – 50.00 cm



- Soglia 0.00 cm – 20.00 cm



- Soglia 0.00 cm – 10.00 cm



Qui di seguito vengono raccolti i dati delle varie operazioni CLOUD TO CLOUD ai diversi valori di soglia (Tab. 4).

Tabella 4- Risultati ottenuti in seguito alle operazioni C2C calcolando la distanza dalla nuvola di punti del GeoSLAM sulla nuvola di punti del KAARTA presa come riferimento

Numero di punti GeoSLAM Zeb Horizon "ridotta"	Soglia	Numero di punti a seguito del C2C	% di punti rispetto alla nuvola di riferimento iniziale
550.624	50 cm	542.241	98%
	20 cm	519.881	94%
	10 cm	420.375	76%

Da questi risultati si evince che la perdita che si verifica al di sotto della soglia dei 10 cm è causata dalla dispersione del LiDAR che ha provocato un errore nel tempo di ritorno del segnale emesso a causa della presenza delle superfici molto riflettenti, dai colori chiari dei materiali presenti esposti al sole, dai telai metallici delle finestre nelle superfici che avevano una radiazione diretta e dalle chiome degli alberi. In aggiunta anche le superfici interne della tromba delle scale che non sono state rilevate dal KAARTA, dovuto al fatto che il laser scanner perdeva l'orientamento a causa della bassa luminosità dell'ambiente (Fig. 19).

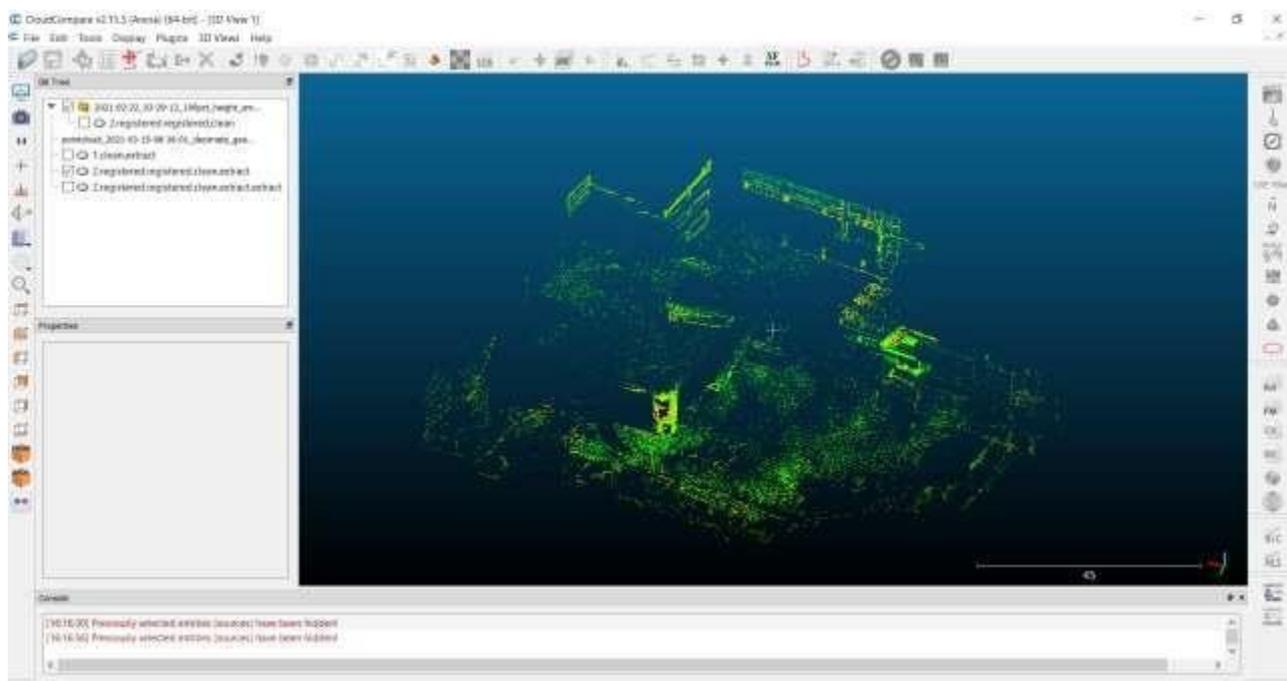


Figura 19- Nuvola di punti che mostra quello che sta al di sopra della soglia di 10 cm.

## 8 CONCLUSIONI

Dallo studio di confronto tra strumenti SLAM espresso in questo elaborato si può concludere che le nuove tecniche per il rilievo tridimensionale con tecnologia MLS presentano numerosi vantaggi: facilità e velocità di utilizzo, abbattimento dei costi per l'acquisizione di un rilievo senza inficiare sulla qualità del risultato che rimane di buona precisione, si arriva ad ottenere accuratèzze centimetriche, ed infine praticità, flessibilità ed ottima portabilità dello strumento. Le nuvole di punti che otteniamo in output ci danno informazioni non solo di tipo strutturale o paesaggistico ma permettono anche di avere notizie sui materiali e le loro composizioni e condizioni, tenendo sempre conto delle caratteristiche intrinseche degli ambienti rilevati.

Altro aspetto che consegue da questo studio è l'importanza del sopralluogo, che determina in maniera diretta la scelta dello strumento che meglio si adatta al tipo di rilievo che si deve completare, tra le diverse offerte del mercato. Infatti come abbiamo spiegato gli strumenti MLS presenti in commercio differiscono per caratteristiche, ad esempio nel nostro studio notiamo due principali differenze nell'acquisizione della nuvola di punti da parte degli strumenti presi in esame: il campo visivo, il GeoSLAM ZEB Horizon a differenza del KAARTA Stencil 2-16 riesce a rilevare anche strutture molto elevate (rappresentata dalla torre nel nostro studio); il numero totale di punti rilevati, il KAARTA Stencil 2-16 riesce a rilevare più punti rispetto al GeoSLAM ZEB Horizon a parità di tempo.

Ed infine nell'analisi dei risultati finali notiamo che l'affidabilità e l'accuratezza di questi strumenti non è intaccata dalla velocità e dalla praticità dell'utilizzo permettendo così di poter svolgere progetti più ampi ed importanti con tempi e costi minori.

## Bibliografia

- Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner, Giorgio P. Vassena, Matteo Sgrenzaroli, Ed. Starrylink, 2007
- 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.
- 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.
- Di Stefano, F., Chiappini, S., Piccinini, F., & Pierdicca, R. (2019, October). Integration and Assessment Between 3D Data from Different Geomatics Techniques. Case Study: The Ancient City Walls of San Ginesio (Italy). In *International Workshop on R3 in Geomatics: Research, Results and Review* (pp. 186-197). Springer, Cham.
- 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.
- 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 & Spatial Information Sciences*.
- I. Toschi, F. Remondino e S. Orlandini, *Mobile Mapping Systems: recenti sviluppi e caso applicativo*, GEOmedia n.4-2015

## Sitografia

- <https://www.microgeo.it/it/che-cos%C3%A8-e-come-funziona-un-laser-scanner-3d.aspx>
- <https://www.topconpositioning.com/it/insights/il-laser-scanner-3d-cenni-storici-princ%C3%ACpi-teorici-tipologie-di-strumenti-e-trattamento>
- <https://www.microgeo.it/it/che-cos%C3%A8-una-nuvola-di-punti.aspx>
- GeoSLAM Zeb Horizon: <https://geoslam.com/solutions/zeb-horizon/>
- KAARTA Stencil 2-16: <https://www.kaarta.com/products/stencil-2-for-rapid-long-range-mobile-mapping/>
- GeoSLAM Hub: <https://geoslam.com/hub/>
- CloudCompare: <https://www.danielgm.net/cc/>