



UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro – Forestali

Corso di studio in Tutela e Riassetto del Territorio

LA TECNICA DEL LASER SCANNING TERRESTRE NELLA RISTRUTTURAZIONE EDILIZIA.

RELATORE:

Prof. Guarnieri Alberto

CORRELATORE:

Prof. Antonio Vettore

Laureando:

Zagato Federico

Matricola: 577801

Anno Accademico 2013/ 2014

LA TECNICA DEL LASER SCANNING TERRESTRE NELLA RISTRUTTURAZIONE EDILIZIA.

INDICE GENERALE:

1. INTRODUZIONE	PAG. 5
2. IL RILIEVO LASER SCANNER TERRESTRE	PAG. 6
2.1. <i>Il rilievo topografico a tema: stato dell'arte</i>	PAG. 6
2.2. <i>Caratteristiche del laser e influenza sulle misurazioni</i>	PAG. 12
2.3. <i>Tipologie e differenze tra laser scanner</i>	PAG. 14
2.4. <i>Laser scanner Leica C 10</i>	PAG. 21
3. LA DELIBERA DEL COMUNE DI PADOVA	PAG. 25
4. IL RILIEVO DELL'ABITAZIONE	PAG. 30
4.1. <i>Lo stato di fatto</i>	PAG. 30
4.2. <i>Operazioni di rilievo dell'abitazione</i>	PAG. 31
4.3. <i>Registrazione delle scansioni (Allineamento)</i>	PAG. 37
4.4. <i>Tecniche di allineamento tra scansioni</i>	PAG. 40
4.4.1. <i>Allineamento mediante presegnalazione</i>	PAG.41
4.4.2. <i>Algoritmo ICP utilizzato per allineare le scansioni</i>	PAG.43

5. ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI TRAMITE LASER SCANNER TERRESTRE _____ PAG.47

5.1. *Estrazione delle misure e delle quote dal modello 3D.* _____ PAG.47

5.2. *Estrazione delle ortofoto dal modello 3D* _____ PAG.50

6. CONCLUSIONI _____ PAG.54

7. BIBLIOGRAFIA _____ PAG.56

INDICE DELLE FIGURE:

- Figura 1: Rilievo intelligente e rilievo con sistema TLS*_____ PAG.11
- Figura 2: Dimensioni dello spot laser alle varie distanze*_____ PAG.14
- Figura 3: : Dimensioni dello spot laser in fase di rilievo* _____ PAG.14
- Figura 4: Comparazione tra le portate del laser scanner a tempo di volo e di quello a misura di fase*_____ PAG.15
- Figura 5: Schema di funzionamento di un sistema laser scanner a tempo di volo*
_____ PAG. 17
- Figura 6: Principio della misura della distanza per differenza di fase*_____ PAG.18
- Figura 7: Schema funzionale del laser scanner triangolatore*_____ PAG.21
- Figura 8: Laser scanner Leica C10*_____ PAG.22
- Figura 9: Campo d'azione del laser scanner Leica C10*_____ PAG.23
- Figura 10: Display del Leica C10 con interfaccia menù*_____ PAG.24
- Figura 11: Scansione del lato sud oggetto di ristrutturazione*_____ PAG.32
- Figura 12: Particolare del prospetto sud in fase di scansione*_____ PAG.37
- Figura 13: Particolare del prospetto ovest durante la scansione*_____ PAG.37

<i>Figura 14: Esempio di sequenza delle rotazioni attorno ai tre assi</i>	PAG.38
<i>Figura 15: Interpretazione geometrica della registrazione</i>	PAG.39
<i>Figura 16: Effetto della propagazione</i>	PAG.42
<i>Figura 17: Comportamento di differenti TLS con target di tipo topografico</i>	PAG.43
<i>Figura 18: Aree di sovrapposizione tra scansione V e U</i>	PAG.45
<i>Figura 19: Metodo punto-piano proposto da Chen & Medioni</i>	PAG.47
<i>Figura 20: Confronto tra metodo punto-punto (a) e metodo punto-piano</i>	PAG.47
<i>Figura 21: Ortofoto del Prospetto Nord con relative quote</i>	PAG.49
<i>Figura 22: Ortofoto del Prospetto Sud con relative quote</i>	PAG.50
<i>Figura 23: Ortofoto del Prospetto Est con relative quote</i>	PAG.50
<i>Figura 24: Ortofoto del Prospetto Ovest con relative quote</i>	PAG.50
<i>Figura 25: Ortofoto del profilo Nord</i>	PAG.53
<i>Figura 26: Ortofoto del profilo Sud</i>	PAG.54
<i>Figura 27: Ortofoto del profilo Est</i>	PAG.54
<i>Figura 28: Ortofoto del profilo Ovest</i>	PAG.55

INDICE DELLE TABELLE:

*Tabella 1: Caratteristiche del laser scanner terrestre*_____ PAG.24

*Tabella 2: Riassunto dei vari stazionamenti*_____ PAG.35

*Tabella 3: Esempio di dati presenti nel file TWF relativo a ciascuna
ortofoto*_____ PAG.47

1. INTRODUZIONE.

La capacità di acquisire grandi quantità di dati tridimensionali in tempi relativamente brevi, unitamente ai notevoli livelli di accuratezza ottenibili, ha portato negli ultimi anni ad una diffusione sempre più ampia della strumentazione laser scanner terrestre (Terrestrial Laser Scanning - TLS) nell'ambito del rilievo topografico. In particolare, la rapidità di misura offerta dai strumenti TLS e la capacità di produrre direttamente modelli assimilabili ad una topografia 3D alquanto accurata della scena reale, rappresentano le caratteristiche principali su cui si basa questo lavoro di tesi. In considerazione dei vantaggi offerti dalla strumentazione TLS il settore edilizia privata del comune di Padova ha emesso in data 25/09/2012 una delibera finalizzata a promuovere l'utilizzo della tecnologia laser scanner 3D per il rilievo di edifici privati da sottoporre a ristrutturazione, previa demolizione dei medesimi. Lo scopo della delibera è quello di dare una responsabilità maggiore ai professionisti incaricati alla redazione dei progetti, in quanto, una volta demolito l'edificio non è più possibile verificarne le dimensioni iniziali che, se erroneamente rappresentate potrebbero scaturire nel conseguimento di vantaggi illegittimi nell'ambito della ricostruzione dell'edificio stesso. Anche se esistono titoli abitativi pregressi, posti agli atti per un eventuale verifica in post demolizione, si è riscontrato che gli stessi non sempre corrispondono agli stati di fatto reali, questo perché le varianti finali non sempre vengono correttamente prodotte, in particolare quelle redatte in sede di condono edilizio, risultando frettolose ed inesatte, ed inoltre con l'introduzione del silenzio assenso sulle istanze di agibilità, i controlli venivano fatti a campione e non su tutti gli edifici. Ulteriori inesattezze sono riscontrate nell'esecuzione dei rilievi dello stato di fatto, spesso inaccurati e poco corrispondenti alla realtà visiva, per non parlare della determinazione della quota zero, spesso riferita a capisaldi facilmente movibili e quindi poco affidabili nel tempo. Ovviamente tutto ciò non viene superato dalla stesura della perizia giurata da parte di un tecnico abilitato, a tal proposito si ritiene opportuno ricorrere ad un rilievo di precisione realizzato con tecnologia "TLS", acquisendo così garanzia di elevata accuratezza nelle misure, possibilità di estrarre dati geometrici dal rilievo nell'eventualità servissero ulteriori elaborati tecnici o verifiche post rilievo, oltre a garantire l'impossibilità di alterazione del rilievo stesso e contemporaneamente la facilità nel calcolo della quota zero dei fabbricati esistenti.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è verificare la possibilità di applicare effettivamente la tecnica TLS al rilevamento dello stato di fatto di un edificio nella fase di pre - ristrutturazione e di derivare dai dati laser acquisiti le informazioni metriche richieste dalla delibera del comune di Padova. A tal fine è stato realizzato un rilievo 3D completo di un edificio, situato in tale comune, per il quale si è ipotizzata la necessità di una ristrutturazione. In particolare si è voluto sperimentare tutte le potenzialità di un approccio che permette, attraverso l'impiego di un unico strumento e dei dati che esso acquisisce, la produzione di elaborati che forniscono una documentazione 3D completa e che pone al centro della metodologia adottata la speditività del rilievo topografico. L'approccio monostrumentale sposa completamente tale concetto, in quanto accedere con un unico strumento permette sia di raggiungere il sito con un equipaggiamento limitato ed inoltre di muoversi in maniera più snella all'interno dello stesso. E' così possibile ridurre sia

i tempi di rilievo complessivi e la quantità del personale impiegato. Inoltre, nel caso in cui nell'area dell'edificio da sottoporre a demolizione (quindi poi a successiva ristrutturazione) sia già stato allestito un cantiere, l'impiego di uno strumento con possibilità di controllo remoto, quale il laser scanner terrestre, aumenta sensibilmente la sicurezza degli operatori che riducono ancora di più la loro permanenza nelle immediate vicinanze dell'edificio. Un altro aspetto irrinunciabile che spinge all'impiego delle tecniche TLS ed alle possibilità che questo offre nel rilievo degli edifici è la grande precisione e completezza dei dati ottenuti dalle scansioni laser. La messa in sicurezza a cui vengono obbligatoriamente sottoposti tutti gli edifici soggetti a ristrutturazione rende impossibile una qualunque operazione di rilievo della struttura eseguita in tempi successivi. Quest'ultima pertanto deve essere effettuata prima della messa in sicurezza ed essere quindi la più esaustiva possibile, tale da rispondere alle esigenze conoscitive richieste per le fasi di pre e post ristrutturazione. Le tecniche TLS, attraverso la nuvola di punti ed il dato fotografico, soddisfano in gran parte proprio questa esaustività. Infatti la nuvola dei punti, ottenuta da una o più scansioni e colorata tramite i colori delle immagini fotografiche, rappresenta di per sé un dato informativo completo relativo all'oggetto del rilievo, conservando intatto il dato morfologico, cromatico e metrico e, come tale rappresenta lo strumento più adatto per essere ispezionato ed interrogato. Quindi l'insieme di questi due dati, la nuvola di punti e la documentazione fotografica ottenuti dallo stesso strumento, forniscono un ampio ventaglio di dati che, trattati separatamente o integrati, possono rispondere alle molteplici richieste degli operatori specializzati in ambiti e discipline diverse tra loro. La tesi si articola in 8 capitoli secondo lo schema seguente: il capitolo 2 descrive lo strumento laser scanner terrestre in tutte le sue caratteristiche e tipologie, soffermandosi sulla descrizione minuta del Leica C10, strumento utilizzato per questo lavoro di tesi. Segue il capitolo 3, dove si descrive la delibera del settore edilizia privata del Comune di Padova oggetto della tesi; successivamente troviamo il capitolo 4, nel quale vengono descritte le varie fasi del rilievo dell'edificio utilizzato per la tesi, compreso l'allineamento tra le scansioni. A seguire il capitolo 5 dove si descrive la fase di estrazione delle misure e delle relative quote dal modello 3D, terminando poi con il capitolo 6 nel quale si riportano le conclusioni di questo lavoro di tesi, seguite dalla bibliografia nel successivo capitolo 7.

2. IL LASER SCANNER TERRESTRE.

2.1 Il rilievo topografico terrestre a tema: stato dell'arte.

Prima di definire le esigenze e gli scopi che si intendono perseguire attraverso un approccio monostrumentale al rilievo è necessario fare una rapida panoramica delle discipline e delle tecniche che sono alla base del rilievo topografico odierno, attraverso una breve descrizione e comparazione delle metodologie di rilievo che si sono assodate nel tempo e nella pratica operativa.

Il metodo di misura più comunemente adottato è costituito dal rilievo topografico classico, basato sull'impiego di strumenti tradizionali quali stazioni totali, distanziometri, ecc.. che consentono di ottenere elaborati grafici aventi scale solitamente comprese tra 1:2000

sino a 1:5000 con precisioni influenzate dagli strumenti adottati. Questo metodo consente l'acquisizione di punti discreti che caratterizzano la geometria dell'architettura e che, attraverso l'elaborazione da parte di un operatore, portano alla ricostruzione dell'edificato. La quantità di nuvole all'acquisizione del rilievo è influenzata dalla complessità della geometria della struttura da rilevare, dalla sua estensione e dagli strumenti impiegati.

La fotogrammetria ha trovato notevoli applicazioni nel campo del rilievo topografico. Questa tecnica consente di conoscere le coordinate 3D di un punto attraverso l'acquisizione di due fotografie del medesimo oggetto acquisite da due posizioni differenti. La conoscenza della geometria interna delle immagini (orientamento interno) e della posizione spaziale all'atto della presa (orientamento esterno) sono i requisiti necessari affinché si possa conoscere a posteriori le coordinate del punto. La tecnologia degli strumenti di acquisizione e gestione delle immagini consentono di avere immagini a scale tali da poter raggiungere tolleranze sub millimetriche. La ricerca dei punti omologhi nelle immagini acquisite, necessaria per risalire alle coordinate, oggi è stata in gran parte automatizzata attraverso l'introduzione di software specifici assistiti e di facile utilizzo, rendendo il processo di restituzione agevole anche per un operatore piuttosto inesperto.

La fotogrammetria digitale terrestre necessita di camere per l'acquisizione, il cui costo è influenzato dalle prestazioni richieste, e da software per la restituzione stereoscopica. La precisione ottenibile attraverso questo metodo va da 1/1000 a 1/10000 della distanza dall'oggetto. Il risultato ottenuto dall'applicazione della fotogrammetria consiste in un insieme di punti che descrivono l'oggetto nello spazio 3D e che attraverso opportune elaborazioni può essere utilizzata per la rappresentazione di particolari rilevanti. La fotogrammetria digitale terrestre rappresenta indubbiamente un metodo di misura alquanto rapido e portatile, considerando che la strumentazione di acquisizione fotografica integrata ha un costo variabile in base alle prestazioni della fotocamera, tantoché in alcune applicazioni l'utilizzo di tale caratteristica può risultare indispensabile.

La fotogrammetria da singolo fotogramma, invece, consente una restituzione 2D delle superfici architettoniche (fotopiano) attraverso l'impiego sia di una camera metrica sia di una camera amatoriale; in entrambi i casi le immagini devono essere poi opportunamente elaborate (tramite fotoraddrizzamento) per rimuovere gli effetti distorsivi del sistema ottico ed ottenere così un prodotto misurabile (o da cui poter estrarre delle misure). Questo metodo consente precisioni che vanno da 1/500 a 1/50 in funzione della distanza di presa. Questo metodo è un metodo piuttosto rapido ed economico, che però non consente la restituzione di superfici curve. La restituzione fotogrammetrica tridimensionale consente una restituzione a partire da strumenti come camere amatoriali e software per l'elaborazione. La precisione che si può ottenere va tipicamente da 1/1000 a 1/500 della distanza di presa. Anche in questo caso si ottengono un insieme di punti rilevati nello spazio. L'economicità, la velocità e la quantità di informazioni immagazzinate rendono questo processo particolarmente vantaggioso. I laser a scansione terrestre tridimensionale rappresentano la tecnologia più evoluta e rapida per l'acquisizione digitale di grandi quantità di dati metrici spaziali, assicurando un ragguardevole livello di dettaglio e completezza. Per chi si è cimentato nel rilievo diretto, architettonico e urbanistico, lo sviluppo recente di sistemi trasportabili di scansione 3D ha realizzato il sogno di ottenere, rapidamente ed in modo automatico, un modello tridimensionale rigoroso dell'oggetto e

velocizzare la fase di gestione dei dati: con un semplice click è possibile la misurazione delle geometrie, archiviare le coordinate spaziali dei punti di interesse e la post-elaborazione dei dati per la modellazione ed il rendering. Il tutto con una modalità di rilievo non invasiva che permette di ridurre drasticamente i tempi ed i costi di progetto. Nato per scopi industriali ed applicato in seguito in topografia, il laser scanning 3D ha cambiato l'approccio classico alle tecniche di rilevamento: questi strumenti topografici elettronici consentono all'utente l'acquisizione autonoma di oltre un milione di coordinate spaziali al secondo, trasformandoli in una "nuvola di punti" appartenenti all'oggetto del rilievo. Tutti gli strumenti laser scanner 3D non hanno bisogno di un operatore in fase di acquisizione, se non per le operazioni di accensione, inquadramento dell'area e avvio della scansione, ma questa semplicità operativa deve necessariamente essere affiancata da un'attenta programmazione delle fasi della campagna di rilievo, in funzione del rapporto forma/contesto. L'accurata predisposizione delle operazioni di scansione permette infatti l'acquisizione anche di forme molto complesse, irregolari o con ampie alberature ed è utile prevedere l'incidenza dei parametri ambientali. Temperatura, condizioni atmosferiche, luce incidente, gli stessi colori dell'oggetto, le finiture superficiali lucide o altri campi elettromagnetici, possono in alcune condizioni interferire con la strumentazione. Le principali fasi della scansione e di elaborazione dei dati sono:

- a) *Messa in stazione dello strumento*: per i laser a scansione terrestre si utilizza un treppiede che non deve essere messo in "bolla".
- b) *Acquisizione dei dati*: viene prodotta la nuvola di punti, la quale però lascia in ombra una parte dell'oggetto; nel caso in cui l'oggetto non sia stato scansionato in modo completo occorre effettuare altre scansioni con una sovrapposizione del 30% di punti in comune.
- c) *Pulitura della nuvola di punti*: si attua un filtraggio del "rumore" presente nella nuvola di punti acquisita (errori standard di divergenza del raggio laser o deviazione dello strumento).
- d) *Allineamento delle singole scansioni*: è la procedura che consente di allineare ed unire le singole acquisizioni in una unica nuvola di punti secondo un determinato sistema di riferimento.
- e) *Triangolazione e costruzione del telaio di punti (mesh)*
- f) *Chiusura del telaio e correzione delle facce anormali*
- g) *Decimazione*: si riduce il modello per rendere più agevole l'elaborazione software.
- h) *Applicazione delle textures al modello 3D*
- i) *Esportazione e rendering*

L'attuale offerta del mercato è in grado di soddisfare ottimamente le esigenze di rilievo, anche se le diverse tipologie di laser scanner implicano alcune differenze e la scelta dello strumento deve essere effettuata in base alle esigenze specifiche di utilizzo. Anche il prezzo è strettamente legato ad alcuni parametri chiave:

1. *Qualità del laser scanner* (range di misura, lunghezza d'onda del segnale, campo visivo, dotazione di camere digitali, tipo di alimentazione, facilità di trasporto, ecc..)
2. *Velocità di acquisizione dati*
3. *Efficienza e semplicità di interfaccia del software acquisizione/gestione dei dati*
4. *Supporto delle case produttrici di hardware e software*

In particolare la maggiore precisione strumentale è determinante per la perfetta integrazione delle parti, permettendo sostituzioni o aggiunte e la riduzione dell'eventualità di dover tornare sul luogo del rilievo. Anche il trattamento dei dati acquisiti non è un'operazione da sottovalutare: l'estrema velocità dei laser scanner 3D e la notevole quantità di dati acquisiti in poco tempo rendono la fase di elaborazione uno step cruciale del rilievo, strettamente legato alla qualità dei programmi di elaborazione dei dati ed al contenimento dei costi.

I sistemi di rilievo a scansione laser sono stati spesso, erroneamente, idealizzati come strumenti del tutto nuovi che potevano fare a meno della tradizione della buona misura: una precisione più elevata di quanto di solito serve o una abbondanza di dati mai vista prima hanno illuso gli utenti del rilievo metrico, inducendoli a sognare un mondo privo dei problemi legati alla misura e alla costruzione di modelli geometrici tridimensionali. L'esperienza ha dimostrato, invece, che non solo è necessario riprendere i tradizionali concetti del rilievo per adattarli a questa nuova categoria di strumenti ma che nuove capacità di analisi e trattamento dei dati devono essere affinate per soddisfare alle sempre crescenti esigenze di coloro che utilizzano il rilievo metrico come base per processi intelligenti di documentazione, rappresentazione, conoscenza e progettazione. E' bene ricordare che non esiste una tecnica di rilievo metrico che possa considerarsi autosufficiente nell'eseguire una qualsiasi operazione di rilievo geometrico indipendentemente dal grado di dettaglio (e conseguentemente di precisione) che si vuole raggiungere. Le migliori soluzioni per la realizzazione di un rilievo geometrico, sia da un punto di vista tecnico che economico, si trovano sempre nella integrazione delle varie tecniche di misura disponibili e considerate più idonee. Ciò comporta che l'utilizzo dei sistemi a scansione laser all'interno di un processo di rilievo metrico deve essere gestito da una professionalità che possieda un'ampia conoscenza di tutte le tecniche di rilievo metrico. Nessuna tecnica può essere a priori esclusa e nessuna nuova tecnica può sostituire totalmente quanto quelle già esistenti sono in grado di produrre.

In tal caso, eppure sotto questo punto di vista, i sistemi a scansione laser possono essere inseriti a pieno titolo tra gli strumenti topografici di misura moderni purché il loro utilizzo sia considerato come un nuovo apporto al processo di rilievo geometrico e non come una tecnica in grado di gettare un colpo di spugna sul passato. Il fatto di poter disporre di una massa notevole di informazioni acquisite senza una logica intelligente, non può far dimenticare che il rilievo metrico è comunque un'operazione intelligente e che solo un'attenta analisi dei dati acquisiti può consentire di raggiungere lo scopo del rilievo metrico e cioè la descrizione della forma e delle dimensioni dell'oggetto.

Prima di affrontare la descrizione dei principi di funzionamento e le regole pratiche di utilizzo degli strumenti TLS è opportuno soffermarsi sul concetto della misura a scansione. Quando si parla di scansione in genere si fa riferimento in modo automatico al concetto del processo di digitalizzazione operato dagli scanner che trascinando un sensore convertono informazioni di tipo analogico in informazioni di tipo digitale. Il trascinamento del sensore avviene senza alcuna logica intelligente: semplicemente si fa in modo che tutto l'oggetto venga acquisito; si pensi come esempio al processo di scansione di un documento mediante un comune scanner DTP. Gli strumenti a scansione laser operano nel medesimo modo. Utilizzando tecniche di misura diverse hanno come fattore comune il fatto di convertire la forma fisica di un oggetto in una serie di punti di coordinate note effettuando una selezione dei punti secondo un ordine preciso di acquisizione e quindi senza operare alcun tipo di scelta sulla necessità o meno del punto acquisito nel processo di descrizione della geometria. E' ovvio che in questa situazione può succedere che i punti utili non vengano affatto acquisiti, come raffigurato nell'esempio in figura seguente.

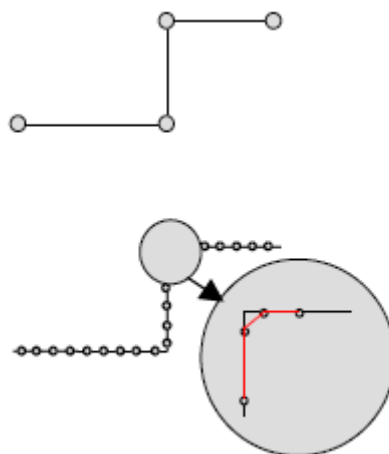


Figura 1 : Rilievo intelligente (sopra) e rilievo con sistema TLS (sotto)

Questo problema non si è mai presentato con le tecniche di rilievo metrico più tradizionali (rilievo manuale, topografico, fotogrammetrico) dove la scelta del punto da acquisire viene effettuata sempre dall'operatore secondo criteri logici di descrizione della forma. Quindi occorre fin da subito considerare che il risultato di una scansione non può essere considerato a rigore un rilievo metrico ma semplicemente una serie di informazioni a partire dalle quali deve iniziare una fase intelligente di interpretazione e codifica dell'informazione. Non devono quindi ingannare le facili visualizzazioni delle nuvole di punti acquisite da un sistema a scansione. Se viste a scala piccola fanno intravedere l'oggetto rilevato, ma se ingrandite denunciano subito la totale assenza di ragionamento che ha governato la fase di acquisizione. L'intelligenza necessaria a trasformare il dato acquisito dai laser a scansione in rilievo metrico deve quindi essere inserita a posteriori mediante tecniche anche complesse in grado di operare su una grande mole di dati. Tali tecniche devono essere il più possibile automatiche e devono tendere all'estrazione delle primitive geometriche a partire dalle quali giungere al processo di modellazione solida e di creazione del modello tridimensionale effettivo costituito da superfici e volumi e non da punti singoli e privi di qualsiasi connessione logica. Solo quando si è raggiunto questo livello di intelligenza è possibile pensare di ricavare rappresentazioni utili alla comprensione di quanto è stato rilevato: piante, prospetti, sezioni, ortoproiezioni, viste prospettiche, modelli 3D eventualmente integrati con informazioni radiometriche.

La tecnica di rilievo mediante laser scanner permette, come nel caso della fotogrammetria, un'elevata acquisizione dei dati in tempi assolutamente rapidi. Questa tecnica utilizza il principio di misura tipico della topografia terrestre, utilizzando strumenti laser che funzionano come delle stazioni totali completamente automatizzate. La precisione di tali strumenti può arrivare fino a valori sub millimetrici in funzione della tipologia del laser scanner e del metodo di acquisizione del dato. La semplicità di utilizzo di questi strumenti, i pochi accorgimenti necessari in fase di presa, la quantità e la qualità del dato metrico acquisito, unito ai costi sempre più accessibili delle strumentazioni di base hanno determinato l'affermazione della tecnica del laser scanner nel rilievo tridimensionale. Il prodotto ultimo della tecnica TLS è la nuvola dei punti, un modello tridimensionale discreto che riproduce più o meno fedelmente, in funzione del dettaglio richiesto, l'oggetto rilevato. Nonostante il grande numero di software e applicativi disponibili, questo processo risulta essere complesso e tutt'altro che automatico, in quanto richiede un notevole dispendio di tempo, di strumentazioni hardware e competenze preposte alla grafica computerizzata, che spesso esulano da quelle del rilevatore.

2.2. Caratteristiche del segnale laser ed influenza sulle misurazioni.

Per comprendere come l'onda elettromagnetica laser influenzi le misure è necessario introdurre brevemente le caratteristiche del segnale laser a partire dalla luce. Essa è un'onda elettromagnetica caratterizzata da una determinata velocità di propagazione nel mezzo, da una frequenza e da una lunghezza d'onda. In particolare un comune fascio luminoso è costituito da un insieme di onde elettromagnetiche caratterizzate da lunghezze

d'onda diverse tra loro. Quando la luce colpisce un materiale questa viene in parte riflessa, in parte assorbita. La riflessione della luce può avvenire secondo diverse modalità : in maniera unidirezionale, diffusamente o lungo più direzioni. Un parametro fondamentale che descrive il comportamento del fascio luminoso riflesso da un materiale è l'albedo. Con tale termine si intende la porzione di luce che viene riflessa indietro in tutte le direzioni; è legata al materiale e soprattutto alle sue caratteristiche di finitura superficiale. Tale coefficiente può essere pari al 100% quando tutta la luce viene riflessa o 0 quando tutta l'onda incidente viene assorbita.

Diversamente dalla luce, il fascio laser (Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation) è caratterizzato dalle seguenti proprietà:

- ✚ MONOCROMATICITA': l'onda laser è caratterizzata da un'unica frequenza di luce.
- ✚ UNIDIREZIONALITA': L'onda elettromagnetica che costituisce il segnale laser viene irradiata lungo una ben precisa direzione.
- ✚ BRILLANZA: Il laser ha un'elevata luminosità.

Comunemente con il termine laser si vuole indicare un dispositivo in grado di trasformare una forma di energia, quale quella elettrica, chimica o nucleare in un segnale con le suddette caratteristiche. Questi dispositivi sono generalmente classificati in funzione del materiale attivo che genera la radiazione: laser a gas, a liquido, a stato solido, a elettroni liberi, ecc.. Esiste un rischio di tipo biologico legato all'esposizione della luce laser: la pelle, gli occhi sono le parti più sensibili e soggette ad alterazioni e lesioni in caso di irraggiamento diretto. Laser particolarmente intensi possono causare addirittura lesioni ad organi interni; per questo si rende necessaria una classificazione ai fini della sicurezza in funzione del limite di emissione ammissibile:

- ✚ *CLASSE 1*: sono laser intrinsecamente sicuri, cioè che non superano mai i livelli di esposizione massima, grazie alla progettazione del dispositivo.
- ✚ *CLASSE 2*: sono laser che emettono radiazioni comprese nelle frequenze del visibile.
- ✚ *CLASSE 3A*: sono laser con potenza in uscita inferiori a 5 MW.
- ✚ *CLASSE 3B*: sono laser con potenze inferiori a 500 MW sia per frequenze visibili e invisibili.
- ✚ *CLASSE 4*: sono laser che superano le potenze della classe precedente, sono i più pericolosi, persino la luce diffusa ha un notevole livello di pericolosità.

Ciò che interessa in particolare in questa trattazione, oltre alle caratteristiche generali e di rischio biologico, sono gli aspetti legati all'accuratezza delle misure, cioè, alla capacità degli strumenti laser di descrivere con accuratezza e precisione il punto reale. E' questa una caratteristica fondamentale di cui si deve tener conto nella fase di scelta dello strumento laser più idoneo al tipo di rilievo che si deve effettuare. Dalla teoria degli errori si può definire l'accuratezza di una misura come il grado di corrispondenza tra il valore teorico e quello misurato di una grandezza. Invece con il termine precisione si vuole indicare la varianza di una serie di misure della stessa grandezza rispetto alla media campionaria relativa delle medesime misurazioni.

Un ultimo aspetto che influenza la misura è la dimensione dello spot laser, ovvero la dimensione dell'impronta del fascio proiettato nella superficie dell' oggetto (figura 2). Caratteristica del raggio laser è la sua debole divergenza, la quale aumenta inesorabilmente in funzione della distanza e riveste un ruolo determinante: tanto più lo spot aumenta tanto più lo strumento non è in grado di distinguere i dettagli o rilevare piccole geometrie.

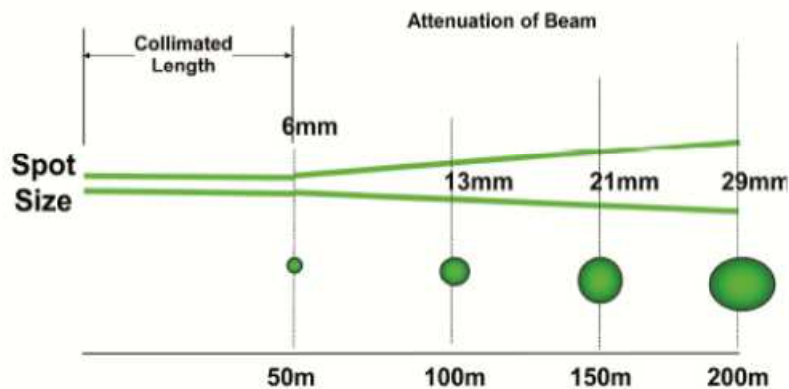


Figura 2: Dimensione dello spot laser alle varie distanze

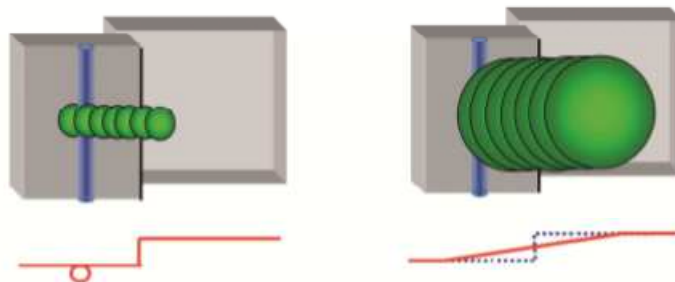


Figura 3: Dimensioni dello spot laser in fase di rilievo

In conclusione la misurazione del punto è soggetta a tre variabili:

- ✚ Precisione della distanza
- ✚ Errore sulla misura laser (distanza errore angolare)
- ✚ Intensità di segnale (funzione della riflessione dell'oggetto misurato)

2.3. *Tipologie e differenze tra laser scanner.*

Il settore della strumentazione laser a scansione 3D è in continua evoluzione e gli strumenti attualmente disponibili sul mercato si differenziano tra loro per molteplici fattori, quali ad esempio: metodi di acquisizione dei dati, precisione delle misurazioni, portata dello strumento ecc. Sono fattori, questi, che influenzano le potenzialità di tali strumenti e che uniti ai numerosi investimenti in termini di ricerca e brevetti, consentono molteplici applicazioni di tali dispositivi nel campo del rilievo 3D in generale. Le varie tipologie di laser scanner terrestre possono essere suddivise in tre classi principali, in base al principio di misura adottato:

- ✚ *LASER SCANNER A TEMPO DI VOLO;*
- ✚ *LASER SCANNER A DIFFERENZA DI FASE;*
- ✚ *LASER SCANNER TRIANGOLATORE.*

I laser scanner a tempo di volo sono strumenti caratterizzati da portate elevate (80-1000m), in funzione della distanza precisione compresa tra 5-15 mm e da una velocità di acquisizione variabile tra qualche migliaio ad alcune migliaia di punti al secondo. I laser scanner a differenza di fase sono strumenti a media portata (1-80m) con una precisione compresa tra i 2 e i 4 mm e una velocità di acquisizione maggiore di 500000 punti al secondo. I laser scanner a triangolazione sono strumenti che hanno delle portate particolarmente basse (qualche decimo di centimetro) con una precisione sub millimetrica.

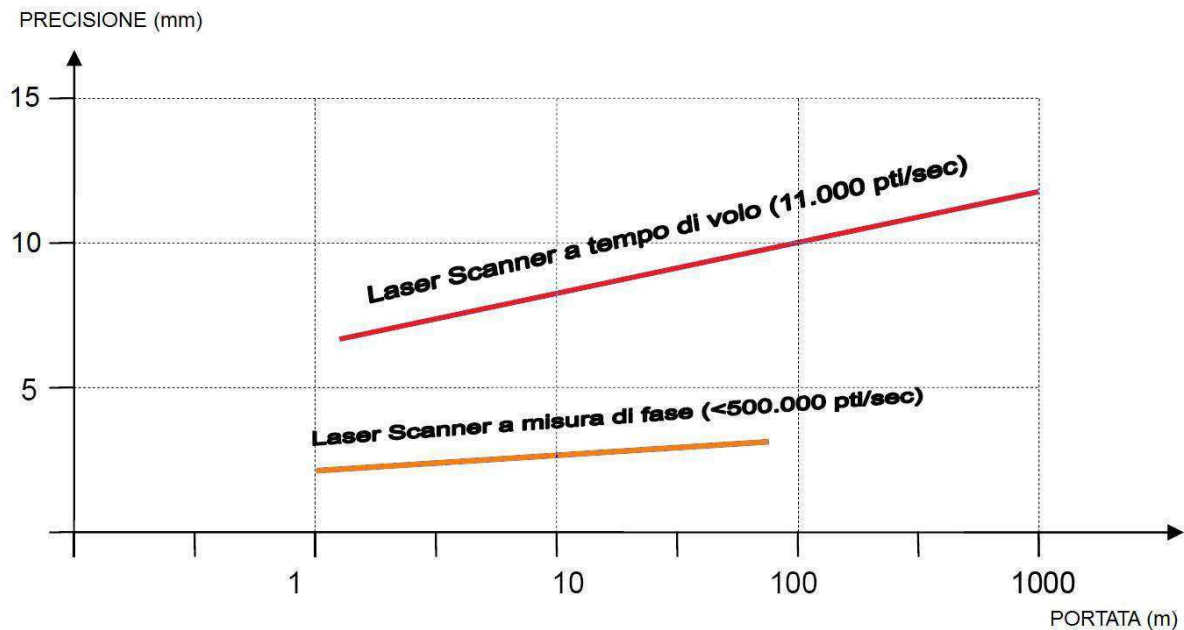


Figura 4: Comparazione tra le portate del laser scanner a tempo di volo e di quello a misura di fase

2.3.1 LASER SCANNER A TEMPO DI VOLO (T.O.F: time of flight).

Il funzionamento di tale strumento (figura 5) si basa su di un generatore di impulsi elettrici che periodicamente impone ad un diodo laser semiconduttore di emettere degli impulsi di luce ad una data lunghezza d'onda. Tale radiazione elettromagnetica, una volta indirizzata e convogliata da una lente di emissione su di un oggetto, torna poi sottoforma di eco di luce riflessa e viene captata da una sensore di ricezione che mediante un fotodiodo la trasforma un segnale elettrico, tipicamente una tensione. Il tempo trascorso tra segnale emesso e segnale captato, viene misurato da un orologio interno stabilizzato al quarzo e inviato ad un microprocessore che lo converte in un valore di distanza, nota la velocità di propagazione nel mezzo considerato (aria) degli angoli di deflessione verticale del laser scanner disposto perpendicolarmente alla dimensione di emissione e dell'angolo di deflessione orizzontale, tramite rotazione del dispositivo laser attorno al suo asse verticale. La determinazione dell'angolo di deflessione verticale del fascio laser viene calcolata attraverso l'impiego di uno specchio rotante disposto perpendicolarmente alla direzione di emissione, viceversa il calcolo dell'angolo di deflessione orizzontale è ottenuta tramite rotazione del dispositivo laser attorno al proprio asse verticale.

Attraverso la conoscenza della misura della distanza "d" dal punto colpito dal raggio laser e dalle misure degli angoli di deflessione è possibile esprimere in coordinate sferiche le coordinate 3D dei punti rilevati. Le coordinate cartesiane, prodotto finale dell'operazione di misura, sono determinate attraverso la conversione delle coordinate sferiche (distanza del punto, angolo azimutale, e angolo zenitale) e sono riferite ad una terna di assi cartesiani ortogonali (x,y,z) disposti opportunamente rispetto alla geometria dello

strumento stesso (figura 5). Tale terna definisce il sistema di riferimento interno del laser scanner.

$$D = \frac{\Delta T * c}{2} \tag{Eq.1}$$

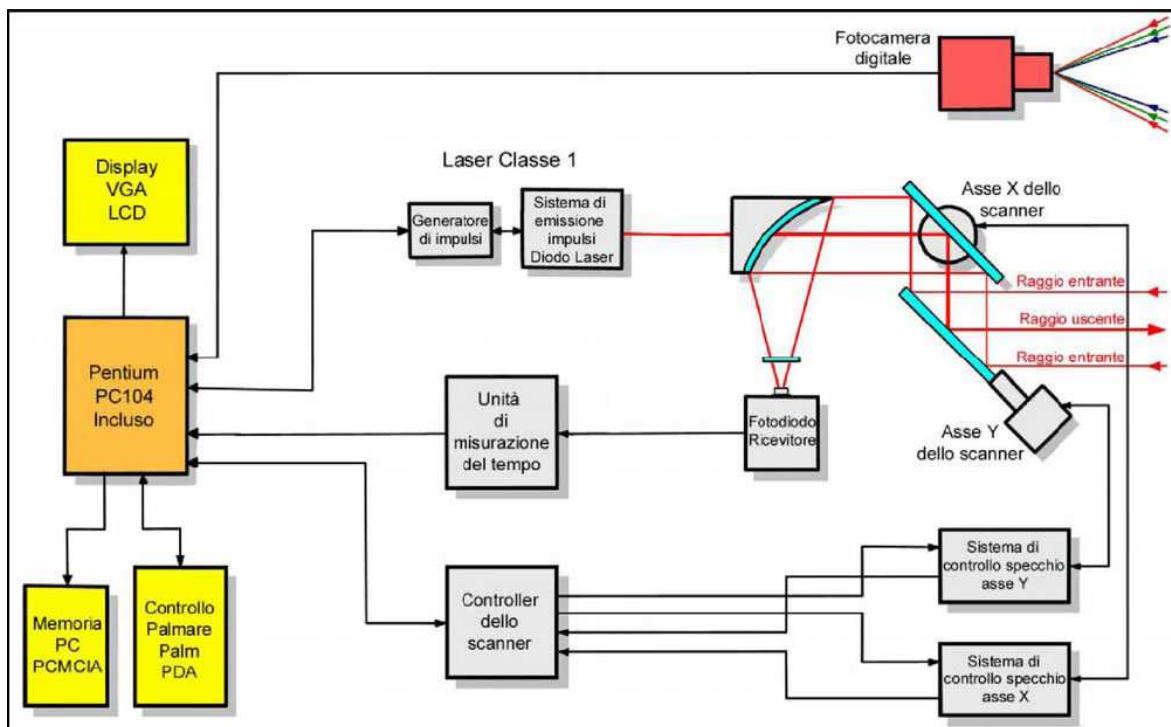


Figura 5: Schema di funzionamento di un sistema laser scanner a tempo di volo

2.3.2 LASER SCANNER A DIFFERENZA DI FASE.

Il funzionamento si basa sull'emissione di una radiazione ottica con lunghezza d'onda corrispondente all'infrarosso vicino ($\lambda = 0,78 \text{ mm}$) che viene modulata e trasmessa verso un prisma retro riflettore; quest'ultimo riflette una parte dell'onda verso l'apparecchio ricevente che interpreta la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta. Questo sfasamento dipende dalla distanza esistente tra il distanziometro e il prisma. I distanziometri a misura di fase sono dunque composti da due parti, una trasmittente ed una ricevente. L'esigenza di mantenere concentrata l'energia dell'onda emessa e quindi di poterne riceverne di ritorno una buona parte, fa sì che si debbano utilizzare onde con

lunghezza d'onda molto piccola (infrarosso vicino). Invece per poter discriminare la fase con precisione è necessario utilizzare una lunghezza d'onda metrica e quindi bisognerà modulare opportunamente l'onda elettromagnetica. Prendiamo ad esempio il caso di un'onda con una lunghezza d'onda maggiore (metrica) qualsiasi e supponiamo di voler misurare, utilizzando quest'onda, una distanza che sia inferiore alla metà di λ . L'onda dopo aver percorso la distanza D si riflette sull'estremo opposto e ritorna al punto di partenza.

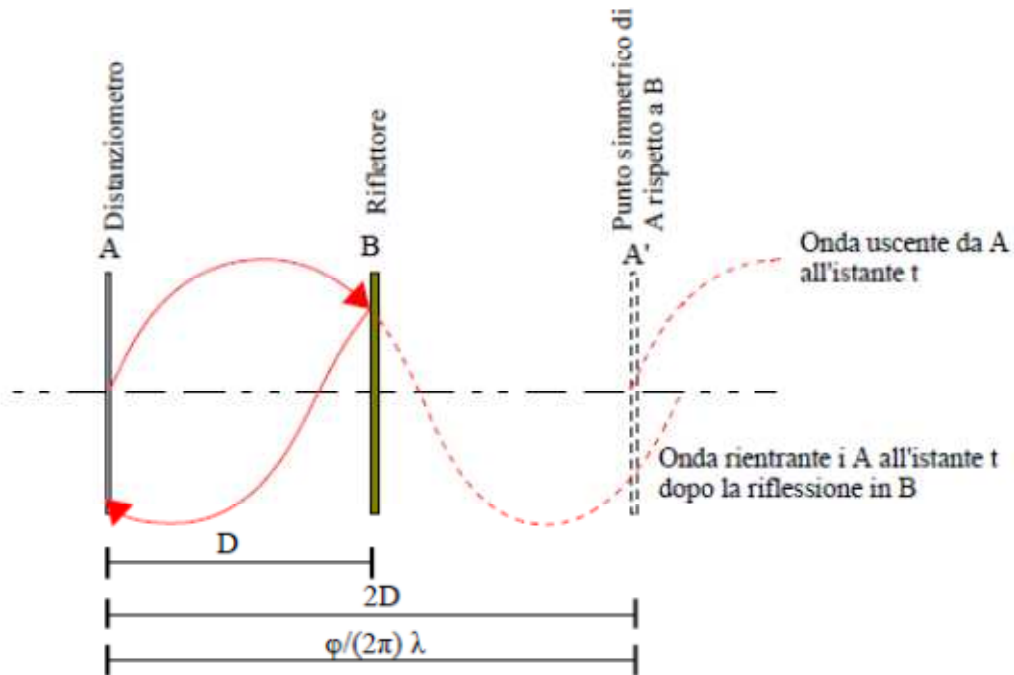


Figura 6: Principio della misura della distanza per differenza di fase (caso $D < \lambda/2$)

Lo sfasamento misurabile tra l'onda trasmessa e l'onda ricevuta sarà funzione della distanza D. Chiamiamo A il punto di emissione e B il punto di riflessione dell'onda. La distanza tra A e B è la distanza che si desidera misurare (D). Si indica con A' il punto simmetrico di A rispetto a B (che dista quindi da A 2D). Il punto A', nel caso non ci fosse riflessione in B, sarebbe raggiunto dall'onda nell'istante generico t. Per tale istante è possibile scrivere il valore dell'ampiezza dell'onda:

$$S_e = A * \text{sen}(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{Eq.2})$$

dove:

S = ampiezza dell'onda al tempo "t"

A = ampiezza massima
 ω = pulsazione = $2\pi f$
 f = frequenza
 φ_0 = fase iniziale
 λ = lunghezza d'onda = c/f
 c = velocità di propagazione

Per l'onda riflessa, tenuto conto che un determinato valore dell'oscillazione si propaga con velocità "c" e che quindi l'onda rientrante riproduce i valori dell'onda uscente con un ritardo di $\Delta t = \frac{2D}{c}$ avremo:

$$S_r = A * \text{sen}(\omega(t - \Delta t) + \varphi_0) \quad (\text{Eq.3})$$

$$S_r = A * \text{sen}(\omega t - \omega \Delta t + \varphi_0) \quad (\text{Eq.4})$$

$$S_r = A * \text{sen}(\omega t - \varphi + \varphi_0) \quad (\text{Eq.5})$$

dove con $\varphi = \omega * \Delta t$ si indica lo sfasamento tra l'onda uscente e l'onda rientrante. Dalla relazione che indica lo sfasamento si avrà:

$$\varphi = \omega \Delta t = \omega \frac{2D}{c} \quad (\text{Eq.6})$$

$$2D = \frac{c * \varphi}{\omega} = \frac{c * \varphi}{2\pi f} = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda \quad (\text{Eq.7})$$

$$2D = \frac{\varphi}{2\pi} * \frac{\lambda}{2} \quad (\text{Eq.8})$$

Da cui si può dedurre che misurando lo sfasamento $\Delta\varphi$ tra l'onda uscente e l'onda riflessa si può ottenere la distanza D come una frazione di metà della lunghezza d'onda impiegata (il rapporto $\varphi/2\pi$ varia tra 0 e 1). Lo strumento che misura lo sfasamento fra due onde si chiama *discriminatore* o *comparatore di fase*. Consideriamo ora il caso in cui il punto di riflessione B sia distante da A di un numero intero di mezze lunghezze d'onda (A' si sposta di un numero intero di lunghezze d'onda). E' evidente che lo sfasamento non cambia perché lungo il percorso 2D si viene ad inserire un numero intero di lunghezze d'onda e si potrà quindi scrivere l'equazione fondamentale dei distanziometri ad onde:

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} * \frac{\lambda}{2} + n \frac{\lambda}{2} \longrightarrow D = L + n * \frac{\lambda}{2} \quad (\text{Eq.9})$$

Il numero intero n si chiama ambiguità. Per misurare una distanza con un distanziometro ad onde occorre quindi misurare lo sfasamento φ e valutare, senza errore, il numero intero di mezze lunghezze d'onda. E' bene puntualizzare che con qualunque distanziometro ad onde la misura dello sfasamento $\Delta\varphi$ permette sempre e solo di valutare quella porzione di distanza che eccede il numero intero di mezze lunghezze d'onda in essa contenuto e che il numero n si può valutare con modalità diverse. I problemi di misura consistono quindi nel ricavare lo sfasamento φ e l'ambiguità " n ". Questa tipologia di strumenti utilizza un raggio laser modulato con un'onda armonica per scansionare i punti che caratterizzano l'oggetto da rilevare. L'onda riflessa dalla superficie dello stesso, viene ricevuta dallo strumento che, attraverso un apparato interno , determina la differenza di fase tra luce emessa e luce ricevuta ed è in grado di calcolare la distanza tra punto e strumento. La reiterazione di questo processo di acquisizione fornisce la distanza di tutti i punti caratterizzanti l'oggetto, quindi la scansione. Assunta $\Delta\varphi$ la differenza di fase, f_{AM} la modulazione della frequenza e c la velocità della luce nel vuoto la distanza D viene calcolata nel modo seguente:

$$D = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi f_{AM}} \quad (\text{Eq.10})$$

La precisione nella definizione della distanza è maggiore rispetto ai sistemi a tempo di volo, ma nel contempo la potenza del segnale luminoso di ritorno deve essere sufficientemente potente, caratteristica questa, che ne limita la portata. La meccanica dello strumento è molto simile alla precedente in quanto composta dalla testa dello strumento che ruota attorno all'asse verticale, attraverso la misurazione degli angoli e delle distanze si ottengono le coordinate sferiche riferite ad un origine posta al centro dello strumento.

2.3.3 LASER SCANNER TRIANGOLATORE.

Il funzionamento di tale strumento si basa sull'emissione (da parte di un diodo laser) di un fascio luminoso che viene ricevuto da un'altro dispositivo (sensore CCD) posto ad una distanza nota (base) dal diodo di emissione. Per la misurazione dei punti, tali tipi di laser scanner utilizzano il principio di intersezione in avanti. In particolare la distanza che intercorre tra strumento e punto da rilevare viene calcolata mediante l'impiego della formula seguente derivata dal teorema di Talete:

$$z = \frac{d \cdot \cot \alpha \cdot \text{tg} \beta}{\text{tg} \beta + \cot \alpha} \quad (\text{Eq.11})$$

Il significato dei parametri presenti nell'equazione 11 è chiaramente desumibile dalla figura 7.

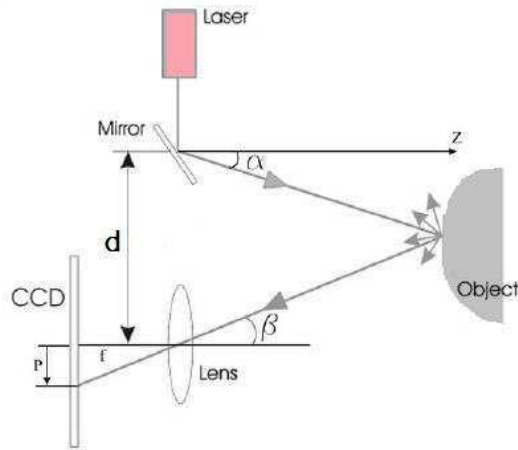


Figura 7: Schema di funzionamento del laser scanner triangolatore

Si osservi che, mentre α viene misurato direttamente, β viene calcolato indirettamente da P, posizione dello spot laser riflesso dall'oggetto, misurato sul sensore CCD, nota la distanza focale "f" all'interno dello strumento.

2.4. LASER SCANNER LEICA C 10.



Figura 8: Il laser scanner Leica C10

Per compiere il rilievo della struttura dell'edificio da ristrutturare si è utilizzato il laser scanner terrestre Leica C10, componente della serie HDS, cioè della famiglia dei sistemi laser ad alta definizione prodotti da Leica Geosystem. Si tratta di una piattaforma compatta "all in one" funzionante secondo il principio del "tempo di volo" (laser TOF), che include scanner, compensatore biassiale, doppia batteria, sistema di controllo e archiviazione dati, videocamera con auto esposizione, piombino ottico laser. Il C10 è uno strumento con il quale non solo è possibile effettuare poligonali topografiche e intersezioni ma è anche possibile utilizzare la scansione di targets per la massima flessibilità nella gestione della logistica del sito. Il campo di azione dello strumento è di tipo sferico (o full dome) e come uno spazio di $360^{\circ} \times 270^{\circ}$, con una portata massima di scansione fino a 300 metri in presenza di una riflettività del materiale pari al 90%. La velocità di scansione (fino a 50.000 punti al secondo) è governata da un sistema proprietario (Smart X-Mirror) che permette di ottenere scansioni "full dome" attraverso specchi rotanti in pochi minuti.



Figura 9: Campo d'azione del laser scanner Leica C10

L'interfaccia dello strumento è costituita da un display "on board" a colori con la risoluzione di tipo QVGA 320 X 240 pixel.

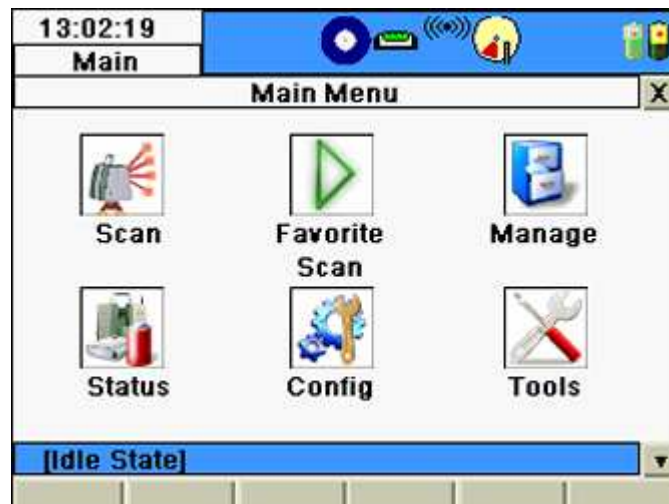


Figura 10: Display del C10 con interfaccia del menù

L'utilizzo dello strumento è reso piuttosto intuitivo grazie l'adozione del sistema operativo Windows Mobile che costituisce la piattaforma software di gestione lato utente. L'avvio delle operazioni, la creazione di progetti e il monitoraggio dello strumento è gestito attraverso icone. La strumentazione di base può essere opportunamente integrata da un PC portatile qualora sia necessario visualizzare e analizzare direttamente in loco i dati acquisiti. I dati vengono immagazzinati all'interno di un hard disk di 80 GB integrato nello strumento e possono poi essere scaricati su un computer tramite connessione usb o ethernet. Sul dispositivo è installata una videocamera in grado di acquisire sia in modalità continua sia a singoli scatti (fotocamera con risoluzione massima di 1920x1920 pixel). Le immagini possono essere così mappate direttamente sulle nuvole di punti tramite il software di post – elaborazione, ottenendo delle rappresentazioni fotografiche alquanto realistiche della scena rilevata. L'accesso alla rete tramite Wi-Fi integrato permette di trasferire l'interfaccia grafica on board su dispositivi ausiliari o su altre periferiche come i-pad oppure i-phone, rendendo possibili molteplici applicazioni attraverso il controllo remoto. L'elaborazione dei dati è affidata al software *Leica Cyclone*, strutturato secondo molteplici moduli ciascuno dedicato ad una specifica fase del processo di modellazione 3D: scansione, registrazione, georeferenziazione, editing e gestione dei dati. Le capacità di elaborazione possono essere incrementate attraverso l'uso di plug-in per software di terze parti, come ad esempio Autocad, che sono messi a disposizione per sfruttare questi ambienti di progettazione.

Di seguito si riporta una tabella che riassume le principali caratteristiche del laser scanner Leica C10.

Precisione delle misure	
Posizione	6 mm
Distanza	4 mm
Angolo (orizzontale / verticale)	60 μ rad / 60 μ rad (12" / 12")
Precisione della superficie modellata**/rumore	2 mm
Acquisire del targhet***	2mm Std deviation
Compensatore biassiale	Selezionabile on/off risoluzione 1", range dinamico +/- 5', precisione 1,5"
sistema di scansione di laser scanner	
Tipo	A impulsi; microcip proprietario
Colore	Verde, lunghezza d'onda = 532 nm
Classe laser	3R
Portata	300 m con albedo del 90%; 134 m con albedo del 18% (portata minima 0,1)
Velocità di scansione	Massima istantanea: fino a 50000 punti/s
Risoluzione di scansione	
dimensioni punto	da 0 a 50 m: 4,5 mm (su base FWHH) 7 mm (su base gaussiana)
dimensione griglia	Completamente selezionabile in senso orizzontale e verticale; distanza minima < 1 mm, per tutta l'aportata; capacità di puntamento sul punto singolo
Campo visivo	
orizzontale	360°
verticale	270°
Puntamento / visualizzazione	Senza parallasse, zoom per riprese video integrato
Ottiche di scansione	Specchio con rotazione verticale su base rotante orizzontale; Smart X-Mirror™ ruota o oscilla automaticamente riducendo al minimo i tempi di
Capacità di memoria dati	80 Gb (disco rigido on board)
Comunicazioni	Dynamic internet protocol (IP) Address, Ethernet
Fotocamera digitale a colori integrata con zoom per riprese video	
Dysplay on board	Controllo dello schermo touch-screen display grafico a colori, QVGA (320 X 240)
Indicatore di livello	Bolla esterna, bolla elettronica nel controllo onboard e software Cyclone
Trasferimento dati	Dispositivo Ethernet o USB 2.0
Piombo laser	Classe laser: 2 (IEC 60825-1) Precisione di centratura: 1,5mm a 1,5m Diametro del punto laser: 2,5 mm a 1,5 m selezionabile on/off
Ingombro e peso	
Scanner Dimensioni (PxLxA)	238mm x 358mm x 395mm
Peso	13 Kg. Nominale (senza batterie)
Batteria (interna) Dimensioni (PxLxA)	40mm x 72mm x 77mm
Peso	0,4 Kg
Batteria (esterna) Dimensioni (PxLxA)	95mm x 248mm x 60mm
Peso	1,9 Kg
Alimentatore AC Dimensioni (PxLxA)	85mm x 170mm x 41mm
Peso	0,9Kg

Tabella 1: Caratteristiche del laser scanner terrestre

3. LA DELIBERA DEL COMUNE DI PADOVA.

Al fine di garantire la regolarità della rappresentazione dello stato di fatto degli edifici sui quali si prevedono interventi di demolizione e successiva ricostruzione, da effettuarsi sia nel contesto delle ordinarie norme di P.R.G sia, in particolare, degli interventi di cui agli articoli 2 e 3 della L.R. 14/2009 cosiddetta "Piano Casa", nell'ambito della documentazione da presentare in sede di domanda di permesso di costruire o di altro titolo abitativo – DIA alternativa al permesso di costruire, DIA ai sensi L.R 14/2009 e s.m.i. – Settore Edilizia Privata, Il comune di Padova ha emesso in data 25/09/2012 una circolare secondo la quale la perizia giurata sulla dimensione dell'edificato può essere sostituita da un rilievo effettuato con tecnologia TLS 3D. La richiesta di detto adempimento ha lo scopo di favorire una maggiore assunzione di responsabilità da parte dei professionisti incaricati nella redazione dei progetti onde evitare che gli elaborati grafici ad essi allegati possano essere erroneamente rappresentati, favorendo, in termini di maggiore volume rispetto a quello effettivo, un possibile conseguimento di vantaggi illegittimi nell'ambito della ricostruzione e ad una irregolarità insanabile dell'edificio ricostruito.

Se anche per la maggior parte degli edifici esistenti sono agli atti titoli abitativi pregressi che consentono l'effettuazione di verifiche sulle loro dimensioni anche una volta attuata la demolizione, si è riscontrato nella prassi che tali rappresentazioni non sempre corrispondono agli stati di fatto reali. Ciò accade per molteplici cause, e a titolo esemplificativo se ne elencano alcune:

- ✚ Le varianti finali, soprattutto nel periodo di espansione edilizia del secondo dopoguerra, non sempre venivano correttamente prodotte, anche perché eventuali differenze riscontrate nei sopralluoghi eseguiti dagli uffici tecnici ai fini del rilascio delle agibilità venivano tollerate, a fronte della mancanza di un efficace sistema sanzionario e di una minore considerazione della rilevanza edilizio – urbanistica delle difformità presenti;
- ✚ Molte delle rappresentazioni redatte in sede di condono edilizio si sono dimostrate frettolose e inesatte;
- ✚ Con l'introduzione del silenzio assenso sulle istanze di agibilità (D.L.g.s 425/94) è venuto meno l'obbligo del sopralluogo degli uffici tecnici in sede di rilascio del certificato di agibilità, per cui i controlli sono stati effettuati solo a campione e non più su tutti gli edifici.

Il Settore Edilizia Privata ha riscontrato che a volte i rilievi sono eseguiti in modo non sufficientemente accurato e che la rappresentazione degli stati di fatto viene effettuata riproducendo la situazione desunta dagli elaborati grafici agli atti di precedenti interventi,

senza una verifica precisa e sistematica della loro corrispondenza con la situazione reale dei fabbricati. Inoltre, la quota zero non è sempre determinata con oculatezza o non viene riferita a capisaldi che rimangano inalterati nel corso dei lavori: di conseguenza, nel corso dei controlli si è spesso riscontrata la difficoltà di rilevare esattamente la quota iniziale e, quindi, l'effettiva altezza dell'edificio preesistente, dato che spesso i fabbricati stessi vengono profondamente modificati nel corso degli interventi di ristrutturazione e/o ampliamento e le quote del terreno vengono a loro volta modificate dagli scavi per le fondazioni, i sottoservizi e il raccordo con i nuovi livelli del fabbricato. Infine i rilievi vengono rappresentati in modo tecnicamente corretto, ma a volte poco intuitivo nella comprensione dei dati.

Quanto sopra descritto risulta, indirettamente, comprovato dalla richiesta di un sempre maggior numero di permessi di sanatoria per difformità riscontrate in sede di compravendita degli immobili.

Tali problematiche non vengono superate dalla produzione della perizia giurata, che, come già detto, riveste essenzialmente il carattere di una assunzione di responsabilità più cogente da parte del professionista incaricato, ma non aggiunge nulla ai dati conoscitivi rispetto ai rilievi tradizionali.

Nella circolare in oggetto il Settore Edilizia Privata del Comune di Padova ritiene che il rilievo di precisione effettuato con tecnologia TLS 3D possa costituire una valida alternativa alla perizia giurata, in considerazione di alcuni importanti vantaggi intrinseci a tale tecnologia, in particolare:

- ✚ Acquisizione di vere e proprie superfici e non di punti discreti come le tradizionali strumentazioni topografiche;
- ✚ Garanzia di elevatissima precisione nelle misure: di conseguenza certezza di congruità con lo stato di fatto nella presentazione delle domande autorizzative;
- ✚ Possibilità di estrarre dati geometrici successivamente al rilievo: ciò consente di aggiungere ulteriori elaborati tecnici e compiere verifiche inizialmente non previste, senza la necessità di ritornare sul posto ad operare nuove misure (che potrebbero essere non più possibili qualora l'edificio fosse stato demolito), dato che i punti rilevati corrispondono all'intero manufatto e, in certa misura, sono perfino sovrabbondanti, in ragione delle elevate potenzialità della strumentazione;
- ✚ Possibilità di utilizzare i dati geometrici all'occorrenza: il rilievo rappresenta una "fotografia" dei luoghi che può anche essere archiviata, e utilizzata in qualsiasi momento successivo in cui si presenti la necessità di controllo, ad esempio in caso di contestazione di possibile abuso edilizio;
- ✚ Impossibilità pratica di alterare i risultati del rilievo, dato l'elevatissimo numero di dati trattati e la loro organizzazione topologica;

- ✚ Facilità di individuazione della quota media del lotto e, di conseguenza, di determinazione della quota zero di impostazione dei fabbricati;
- ✚ Maggiore facilità di utilizzo del rilievo, fornito in formato CAD, nella redazione degli elaborati di progetto;
- ✚ Aggregazione del rilievo al database del sistema informativo territoriale del Comune.

Inoltre il Comune stesso evidenzia la possibilità di ulteriori vantaggi:

- ✚ Maggiore celerità nella verifica urbanistica;
- ✚ Maggiore sicurezza e rapidità nella definizione dei risultati in caso di sopralluogo per eventuali segnalazioni e/o esposti;
- ✚ Possibilità del certificato di agibilità in tempi abbreviati;
- ✚ Possibilità di certificare le procedure seguite, al fine di attestare la regolarità edilizia degli edifici;
- ✚ Eliminazione dei controlli d'ufficio a campione prima dell'inizio dei lavori o in corso d'opera;
- ✚ Maggiore garanzia di evitare sanzioni;
- ✚ Maggiore garanzia nelle transazioni immobiliari;
- ✚ Notevole riduzione dei rischi connessi con eventuali profili penali.

La circolare del Settore Edilizia Privata prevede inoltre che nel caso di scelta della tecnologia laser scanner 3D per il rilievo degli edifici, gli elaborati debbano riportare la rappresentazione dello stato di fatto con le misure essenziali richieste dal regolamento edilizio (inerenti le dimensioni esterne della pianta, dei prospetti, delle distanze dai confini e dai fabbricati circostanti e le quote essenziali del terreno riferite a capisaldi esterni, alle quali potranno essere aggiunte quelle interne, a cura del professionista incaricato, con le rispettive quote dei locali, dei solai interpiano, ecc.), secondo quanto previsto dagli articoli 35 e 36 del R.E. vigente.

3.1. MODALITA' DI ESECUZIONE DEI RILIEVI.

Di seguito vengono riportate le indicazioni fornite dal settore Edilizia Privata del Comune di Padova per l'esecuzione dei rilievi degli edifici con strumentazione TLS.

A. Metodologia del rilievo per ciascun edificio:

- ✚ Acquisizione di immagini digitali ad alta risoluzione delle facciate esterne;
- ✚ Rilievo laser scanner terrestre, con recupero delle informazioni al contorno utili al controllo e/o alla progettazione, ovvero edifici limitrofi e piano campagna, con particolare attenzione alla strada ed ai marciapiedi;
- ✚ Rilievo delle facciate attraverso sistemi laser scanner con integrazione fotogrammetrica.

B. Produzione modelli 3D e ortofoto:

Il rilievo fotogrammetrico e la ricostruzione tridimensionale degli edifici e delle aree limitrofe, devono essere effettuati contestualmente, acquisendo i due diversi dataset di informazioni mediante tecniche di rilievo laser scanner terrestre e camera digitale metrica o calibrata. In caso di presenza di ostacoli, i rilievi laser vanno effettuati da più angolazioni, intervenendo anche con strumentazioni topografiche tradizionali (stazioni totali).

Caratteristiche strumentali:

- Distanze misurabili: da 2 metri fino a 400 metri;
- Precisione nella misura: tipica +/- 6 millimetri (fino a +/- 2 millimetri con medie);
- Risoluzione delle misure: 5 millimetri

Per la georeferenziazione delle singole stazioni di misura e dei prismi riflettori, opportunamente distribuiti nell'area di interesse, è richiesto l'impiego di strumentazione topografica classica (total station).

C. *Elaborazione dei dati:*

- ✚ Calcolo e compensazione dei dati topografici derivanti dai rilievi con total station per la mosaicatura delle scansioni (poligonali e punti di irraggiamento);
- ✚ Pre - elaborazione delle singole nuvole di punti e georeferenziazione delle stesse;
- ✚ Attribuzione del valore RGB alle singole nuvole di punti, previo trattamento dei fotogrammi acquisiti;
- ✚ Progressiva mosaica tura delle varie nuvole di punti;
- ✚ Operazioni di cleanup della nuvola totale e progressivo alleggerimento della stessa mediante tecniche di filtraggio;
- ✚ Produzione della nuvola di punti relativa al fabbricato;
- ✚ Individuazione dei piani di proiezione e produzione delle ortofoto;
- ✚ Pulitura delle nuvole di punti tramite procedure semiautomatiche e manuali per minimizzare la presenza di oggetti estranei, consentendo, nei limiti del possibile, una fedele ricostruzione tridimensionale degli edifici.

D. *Produzione di ortofoto digitali e files CAD.*

Dai modelli 3D dell'edificio devono essere estrapolate immagini metricamente corrette (ortofoto) da fornire al progettista committente, atte a rappresentare, in modo esaustivo, le facciate dei singoli manufatti. Gli elaborati vanno realizzati in formato CAD con le ortofoto e le opportune quotature: elaborati costituiranno la base grafica per la produzione delle tavole dello stato di fatto e di progetto, e contemporaneamente saranno strumento di controllo speditivo da parte del Comune.

Quotatura dell'edificio:

La circolare del settore Edilizia Privata del Comune di Padova fornisce anche una serie di precise istruzioni per quanto riguarda la quotatura dell'edificio sia delle sue parti componenti/accessorie attraverso il modello laser scanner 3D:

- ✚ La quota zero rappresenta la quota di impostazione dell'edificio sul terreno, ovvero di ciascun corpo del fabbricato nel caso in cui questo sia disposto a livelli sfalsati;
- ✚ La quota di riferimento è definita dalla quota dell'asse strada o di altro punto notevole, che viene indicato dal professionista in fase di rilievo e confermato dal Comune in sede di rilascio o verifica del titolo abitativo. Dovrà essere quotato anche il dislivello tra la quota zero e la quota di riferimento;
- ✚ La quotatura orizzontale dell'edificio va effettuata con particolare attenzione alla sua sagoma e riferita alle murature perimetrali. Le parti in oggetto, quali scale, terrazze, portici, pensiline, ecc, vanno quotate separatamente.
- ✚ Le altezze delle murature perimetrali sono misurate a partire dalla quota zero come sopra definita fino all'intradosso della copertura, e a partire dalla quota zero fino all'estradosso della copertura. Le quote devono essere riportate ad ogni punto di discontinuità dell'altezza delle murature (per esempio il colmo del tetto).
- ✚ Vanno inserite tutte le quote utili per determinare le altezze dei piani, quali la quota di impostazione delle terrazze, la quota dei davanzali delle finestre, ecc..
- ✚ In pianta dovranno essere quotate le distanze tra gli edifici.

I risultati delle elaborazioni devono essere presentati in file grafici in formato dxf/dwg (Autocad 2009 o precedenti) in formato pdf alla scala 1:100.

4. RILIEVO DELL'ABITAZIONE.

4.1. LO STATO DI FATTO.

L'edificio utilizzato si presenta per verificare l'applicabilità della tecnica laser scanner terrestre nell'ambito del rilievo topografico ai fini della ristrutturazione edilizia, come una struttura in accettabile stato conservativo, non compromessa sotto l'aspetto statico. Si distinguono due differenti corpi del complesso: il primo, originale, è composto da cortile, blocco centrale, porticato ed annesso rustico nel lato est, mentre un secondo edificio di più recente costruzione completa la planimetria a nordest. Lo stesso edificio si compone di due parti, rispettivamente la parte già presente e ristrutturata e la parte di nuova costruzione, le quali risultano poi collegate nel lato Nord dell'esistente fabbricato, e quindi lo consideriamo un unico nucleo abitativo. L'abitazione è situata in un lotto singolo di circa 5000 metri quadri, e si presenta costituita da due piani, con un'altezza complessiva, misurata dalla quota campagna fino all'estradosso del tetto, di sette metri (7 m), estendendosi lateralmente per una lunghezza di metri quattordici (14 m), mentre nel fronte presenta una larghezza di metri otto e mezzo (8,50 m).

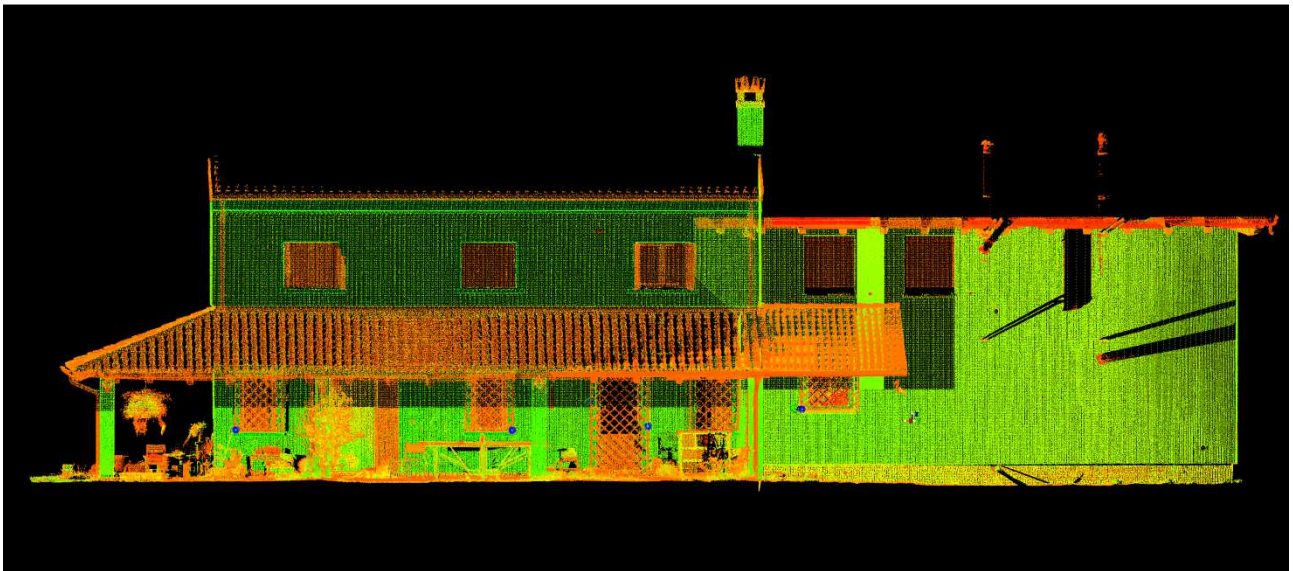


Figura 11: Scansione del lato sud dell'abitazione oggetto di ristrutturazione

4.2. OPERAZIONI DI RILIEVO DELL'ABITAZIONE.

I vantaggi ottenibili nell'ambito del rilievo topografico attraverso l'utilizzo della strumentazione laser scanner terrestre non escludono una ponderata progettazione della campagna di misura al fine di ottenere un prodotto finale con caratteristiche di qualità rispondenti alle esigenze del rilievo stesso. La fase di acquisizione viene gestita in maniera completamente automatica dallo strumento stesso, per cui non vi è la necessità da parte dell'operatore di conoscere la sequenza dei punti che vengono rilevati. D'altro canto, l'automatizzazione dello strumento non permette l'acquisizione di punti discreti scelti dall'operatore. Questi aspetti, che escludono l'intervento diretto del tecnico nella fase di acquisizione, sono solo alcune delle motivazioni che richiedono un'accurata progettazione del rilievo, tale da mettere lo strumento in condizione di descrivere al meglio l'oggetto reale e di facilitare e controllare le operazioni di registrazione delle scansioni. Essendo il TLS una strumentazione di tipo ottico, e quindi in grado di acquisire solamente tutto ciò che è da esso visibile, in fase di restituzione, nelle nuvole di punti acquisite si possono presentare delle zone d'ombra caratterizzate da assenza di misure laser, dovute alla complessità geometrica dell'oggetto misurato o ad eventuali ostacoli interposti lungo la direzione di propagazione del raggio laser.

In generale, il numero di scansioni necessarie per ottenere un rilievo completo ed esaustivo dell'area di interesse dipende dalla complessità geometrica della scena da rilevare e dalla profondità degli oggetti che compaiono al suo interno.

La fase del rilievo per mezzo di laser scanner deve quindi essere preventivamente pianificata, tenendo conto dei seguenti aspetti:

- ✚ Riduzione delle zone d'ombra e, quando possibile, delle occlusioni (oggetti sulla scena che interferiscono con la propagazione del raggio laser);
- ✚ Angolo di visione (campo di vista, F.O.V ovvero field - of - view);
- ✚ Sovrapposizione minima tra le scansioni;
- ✚ Risoluzione spaziale omogenea delle scansioni;
- ✚ Visibilità dei target;
- ✚ Risoluzione delle immagini;
- ✚ Punti di vista per l'acquisizione fotografica prossimi a quello del laser scanner, nel caso in cui si utilizzi una fotocamera esterna non incorporata con lo strumento laser.

Una volta individuati gli aspetti principali che possono influire in fase di presa nella qualità delle misure, si può procedere alla messa in stazione dello strumento e all'impostazione della risoluzione di scansione e il numero dei punti che si vuole acquisire. Come verrà più dettagliatamente descritto nel paragrafo 3.3, una volta acquisite le scansioni dalle varie stazioni, esse vanno mosaicate al fine di ricostruire il modello 3D completo dell'oggetto di interesse. La procedura di mosaicatura, meglio nota con il nome di registrazione o allineamento delle scansioni, può essere effettuata secondo due metodologie:

- a) Usando target artificiali retroriflettenti e dislocati opportunamente sulla scena;
- b) Tramite punti corrispondenti individuati manualmente su coppie di scansioni adiacenti.

La disposizione dei target sulla scena deve essere studiata in modo tale che ogni scansione ne contenga almeno tre (due nel caso in cui sia stata precedentemente assicurata la verticalità dello strumento). Ciò vuol dire che una volta individuato il numero di scansioni necessarie al fine di coprire l'intera superficie da rilevare, è necessario disporre sulla scena una serie di target identificativi in modo tale che da ogni scansione sia visibile una quantità minima degli stessi. Qualora per vari motivi non sia possibile utilizzare i target, è opportuno garantire ampie zone di sovrapposizione tra le scansioni, così da offrire all'algoritmo di allineamento (generalmente di tipo ICP) dati necessari su cui lavorare. In generale è opportuno che negli edifici con architetture articolate si proceda all'utilizzo di target per un allineamento più agile e preciso.

La campagna di rilievo dell'edificio scelto per la tesi ha prodotto 8 scansioni complessive. Le singole nuvole così ottenute hanno comunque la proprietà di essere immediatamente leggibili ed interpretabili, poiché l'insieme dei punti distribuiti nello spazio già descrivono bene l'ambiente e lo scenario catturato in fase di presa.

La singola nuvola può essere visualizzata, in fase di elaborazione, in modalità "false color" oppure in modalità mappata. La visualizzazione in false color è possibile grazie al valore della riflettenza (o dato di intensità) che lo strumento è capace di acquisire per ogni impulso di luce laser ricevuto. Tale caratteristica è definita come la quantità di luce riflessa rispetto alla luce incidente e dipende sia dalle caratteristiche del materiale colpito dalla luce laser sia dal colore dello stesso. L'interpretazione di questa visualizzazione da parte di un tecnico fornisce dati relativi alla scabrezza del materiale e può rendere distinguibili due materiali successivi che costituiscono uno stesso prospetto. Anche la presenza di acqua sulla superficie dell'oggetto rilevato influenza il parametro della riflettenza per cui è possibile poter vedere infiltrazioni sui prospetti murari o sulle pareti. La visualizzazione in "true color" invece consente di visualizzare la nuvola di punti su cui viene mappata la fotografia presa singolarmente. Questo dato completato dal dato RGB fotografico descrive in maniera realistica gli ambienti scansionati. Le operazioni di misura svolte per questo lavoro di tesi si articolano in 8 stazioni principali da ciascuna delle quali sono state

acquisite una serie di scansioni sia delle superfici murali esterne sia di particolari rilevanti e target necessari ai fini della successiva restituzione grafica del rilievo in oggetto. Mediamente, ogni singola stazione del laser scanner ha richiesto un tempo di circa un'ora, impiegato in parte per effettuare la scansione vera e propria ed in parte per procedere alla messa in stazione dello strumento. In particolare questa fase comprende le seguenti operazioni:

- 1) Posizionamento del laser scanner sull'apposito cavalletto di sostegno (treppiede) in modo da garantire la verticalità del medesimo (condizione indispensabile per il metodo di allineamento delle scansioni adottato in questo lavoro);
- 2) Dislocazione dei target retroriflettenti sulle varie facciate dell'edificio secondo una specifica geometria;
- 3) Impostazione, tramite display touch screen integrato sullo strumento laser, di vari parametri di scansione (campo di vista, risoluzione spaziale di scansione, risoluzione delle immagini fotografiche, ecc.)

Per rilevare l'intero edificio, vista anche la sua complessità geometrica e le sue dimensioni, si è impiegato un tempo comprendente dalle ore nove del mattino fino alle ore diciotto pomeridiane. Per ogni stazione laser si sono acquisiti mediamente sei target utili ad allineare tra di loro le nuvole di punti, acquisite nelle rispettive stazioni, in fase di post-elaborazione tramite software specifico (Cyclone). Per ciascuna acquisizione, durante la fase di avvio, è stato impostato anche il passo medio di scansione, il cui valore dipende innanzitutto dal livello di dettaglio che si desidera ottenere. Ad esempio è possibile effettuare un'acquisizione globale a 360° (quindi a bassa risoluzione) oppure una presa più dettagliata della facciata di interesse o di una porzione della stessa dove possono essere presenti dei particolari costruttivi od architettonici significativi per il rilievo stesso. Nel caso del Leica C10, così come in tutti gli strumenti TLS con campo di vista sferico, ogni scansione è caratterizzata da una risoluzione variabile in funzione della distanza laser – oggetto: maggiore in prossimità dello strumento e minore man mano che ci si allontana da esso. Per tale motivo l'operatore deve inizialmente impostare il passo di scansione desiderato ad una determinata distanza (passo medio). Ciascuna nuvola di punti acquisita risulterà in generale più densa a distanza minore di 0 e più sgranata a distanze maggiori. Per il rilievo in questione si è scelto un passo di scansione avente risoluzione media di 1 centimetro a 12 metri per le acquisizioni più dettagliate, mentre per le panoramiche a 360° si è scelto un passo medio di 1 cm a 25 metri. La scelta di questi due diversi valori di risoluzione spaziale è stata fatta tenendo anche conto dell'architettura dell'edificio oggetto di rilievo, nonché della sua forma e delle sue dimensioni. Il tempo medio di ogni stazione è quindi funzione del passo di scansione, adottato in fase di acquisizione, in base alle caratteristiche fisiche che presenta l'edificio rilevato. Successivamente all'acquisizione è stata eseguita la registrazione delle scansioni in ambiente Cyclone. A tal fine sono stati utilizzati dei target

retroreflettenti posizionati sulla scena in modo da essere visibili dalle stazioni adiacenti. In particolare, per ogni stazione sono stati impiegati sei target di cui tre posti da un lato della stazione e altri tre posti da quello opposto in modo da poter poi registrare correttamente, in fase di post – elaborazione, la stazione corrente con la successiva e viceversa la stessa con la precedente. Alcuni di questi target sono stati posizionati su di elementi metallici, presenti all’interno della scena rilevata, tramite appositi magneti posti nella parte posteriore degli stessi, mentre altri sono stati posizionati su dei supporti idonei, al di fuori della scena oggetto di scansione. In questo caso si ha il vantaggio che i target non sono visibili sull’oggetto rilevato e quindi, in fase di elaborazione, non sussiste la necessità di rimuoverli manualmente dalla scena. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva di tutte le stazioni con i rispettivi target utilizzati.

<i>LASER SCANNING DATA REGISTER</i>		Data:		04/07/2013			
Nome Database:		Rilievo casa		Ora Inizio:	9:00	Ora Fine:	18:00
		Temperatura:		25°C			
Nome Progetto:		Ristrutt. 1		Umidità:		85%	
Note: Rilievo civile abitazione mediante laser scanner terrestre con utilizzo di target							
N° scan	Scan ID	Target inclusi nella scansione	Risoluz. scansione	Tempo di scansione	Note		
1	s 01	T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10	1cm a 12m	2 minuti	Panoramica 360°		
2	s 02	T2,T3,T6,T7,T8,T9,T11	1cm a 12m	7 minuti	Panoramica 360°		
3	s 03	T3,T5,T8,T9,T11,T12,T13	1cm a 20m	2 minuti	Panoramica 360°		
4	s 04	T9,T12,T13	1cm a 12m	2 minuti	Panoramica 360°		
5	s 05	T9,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18	1cm a 30m	2 minuti	Panoramica 360°		
6	s 06	T1,T2,T18,T19,T20	1cm a 25m	7 minuti	Panoramica 360°		
7	s 07	T1,T4,T19,T20	1cm a 10m	3 minuti	Panoramica 360°		
8	s 08	T4,T17,T18,T19,T20	1cm a 12m	2 minuti	Panoramica rapida a 360°		

Tabella 2: Riassunto dei vari stazionamenti fatti



Figura 11: Particolare del prospetto sud in fase di scansione



Figura 12: Particolare del prospetto ovest durante la scansione

4.3. REGISTRAZIONE DELLE SCANSIONI (ALLINEAMENTO).

Una volta ottenute le singole scansioni è necessario assemblarle tra loro al fine di creare un'unica nuvola di punti. La fase di allineamento o registrazione delle scansioni consiste nell'effettuare la stima dei parametri di rototraslazione tra diversi sistemi di riferimento in cui sono espresse le coordinate dei punti presenti nelle varie scansioni. Geometricamente, date due diverse scansioni, associate a due sistemi di riferimento intrinseci Q (O_1, X_1, Y_1, Z_1) e D (O_2, X_2, Y_2, Z_2), l'allineamento consiste nell'imporre una rototraslazione ad uno dei sistemi di riferimento (ad esempio di Q su D), in modo tale da ottenere la coincidenza delle origini e la rotazione degli assi omologhi così da risultare paralleli tra loro (Figura 13).

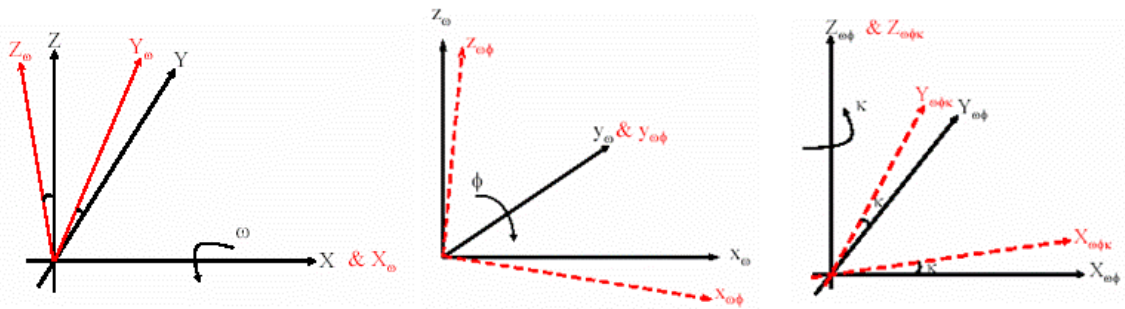


Figura 13: esempio di sequenza delle rotazioni attorno ai tre assi secondo lo schema (ω, ϕ, κ)

Analiticamente la rototraslazione nello spazio tridimensionale è una trasformazione rigida, descritta da una matrice R di rotazione e da un vettore "t" spostamento (equazione 12).

$$R = \begin{pmatrix} \cos\phi\cos\kappa & \cos\omega.\sin\kappa + \sin\omega.\sin\phi\cos\kappa & \sin\omega.\sin\kappa - \cos\omega\sin\phi\cos\kappa \\ -\cos\phi.\sin\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\phi\sin\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega.\sin\phi.\sin\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega\cos\phi & \cos\omega\cos\phi \end{pmatrix} \quad (\text{Eq.12})$$

La matrice “R” è il risultato del prodotto di più rotazioni consecutive, calcolato rispettivamente attorno all’asse X attorno all’asse Y e attorno all’asse Z dello strumento (Figura 14 ed equazione 13).

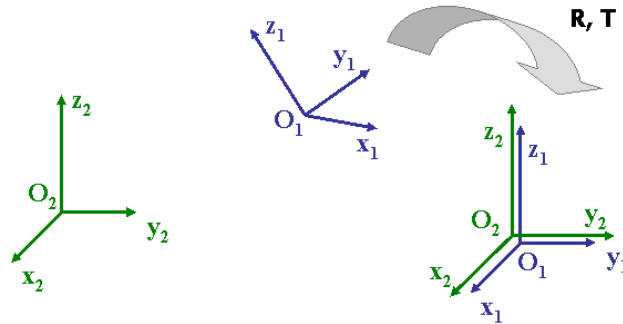


Figura 14: Interpretazione geometrica della registrazione

$$\begin{pmatrix} X_2^P \\ Y_2^P \\ Z_2^P \end{pmatrix} = \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} X_1^P \\ Y_1^P \\ Z_1^P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (\text{Eq.13})$$

Essendo rispettivamente:

- $X_1^P, Y_1^P, Z_1^P = P(\Sigma_1)$, coordinate del punto P nel sistema Σ_1
- $X_2^P, Y_2^P, Z_2^P = P(\Sigma_2)$, coordinate del punto P nel sistema Σ_2
- $t_x, t_y, t_z =$ vettore di traslazione dell’origine di Σ_1 rispetto a Σ_2

L'operazione sopradescritta non gode della proprietà commutativa, quindi è importante conoscere l'ordine con le quali vengono eseguite le rotazioni, al fine di evitare errori quando si passa da un software ad un altro, in quanto tali pacchetti software non adottano sempre le stesse convenzioni delle rotazioni. L'operazione di rototraslazione si caratterizza per le seguenti proprietà:

- ✚ la rototraslazione coinvolge sempre e solo due sistemi di riferimento
- ✚ La rototraslazione lega tra loro coppie di punti aventi differenti coordinate di posizione ma rappresentanti fisicamente lo stesso punto
- ✚ La stima dei parametri R e t richiede la conoscenza di un numero minimo di punti di coordinate note in entrambi i sistemi di riferimento (Punti omologhi, punti di legame, corrispondenze)
- ✚ L'individuazione delle corrispondenze esiste solo se esiste un minimo di sovrapposizione tra le scansioni coinvolte. Uno studio condotto da ricercatori suggerisce di avere un'area di sovrapposizione almeno del 30% o superiore al fine di ottenere un allineamento delle scansioni che non porti al deterioramento della precisione di acquisizione.

La soluzione al problema della determinazione del numero minimo di punti analoghi necessari per effettuare l'allineamento si ottiene considerando il bilancio tra numero di incognite e numero di equazioni disponibili. I parametri incogniti sono 6, tre incognite di rotazione e tre di traslazione, mentre le equazioni che si possono scrivere sono tre per ogni coppia di punti (in X,Y,Z). Poiché un sistema di equazioni è risolvibile se e solo se il numero delle equazioni è almeno uguale al numero delle incognite; ne consegue che il numero di punti necessario è due. Tale risultato è solo apparentemente in contrapposizione con i dettami della topografia e della fotogrammetria, i quali affermano la necessità di almeno tre punti non allineati, per eseguire la trasformazione. In verità tra le due affermazioni non sussiste alcuna discordanza dal momento che le scansioni sono effettuate con lo stesso strumento, e quindi non è necessario introdurre un settimo parametro nella trattazione analitica, il fattore di scala che tiene conto della diversità tra i sistemi di misura. I software utilizzano solitamente 3 punti omologhi, ma la registrazione viene comunque effettuata attraverso una trasformazione con 6 parametri e non a 7: la coppia di corrispondenze addizionale, rispetto al valore teorico calcolato precedentemente, permette di disporre di una ridondanza minima di equazioni di misura e quindi di risolvere il problema applicando il metodo dei minimi quadrati. Il concetto alla base di tale metodo di calcolo si fonda sulla considerazione che tra l'insieme di due punti corrispondenti "P" (sorgente) e "Q" (destinazione), a causa degli inevitabili errori di misura non è possibile determinare una trasformazione $T(R,t)$ che applicata ai punti di P soddisfi in modo esatto un insieme di relazioni del tipo:

$$T(p_i) = q_i \quad \forall p_i \in P; \forall q_i \in Q \quad (\text{Eq.14})$$

Quindi risulterà:

$$q_i - T(p_i) = v_i \quad v_i = \text{residuo } i\text{-esimo} \quad (\text{Eq.15})$$

Ricorrendo alla teoria dei minimi quadrati, la stima dei parametri della trasformazione T viene trattato come un problema di minimizzazione non lineare di un funzionale quadratico. La precisione di una trasformazione viene valutata calcolando l'errore quadratico medio (RMSE) dei residui V_i relativi agli N punti corrispondenti.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(v_x)_i^2 + (v_y)_i^2 + (v_z)_i^2]}{N}} \quad \text{con} \quad \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_x - T(p_x) \\ q_y - T(p_y) \\ q_z - T(p_z) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.16})$$

4.4. TECNICHE DI ALLINEAMENTO TRA SCANSIONI.

Una volta ottenute le scansioni si procede alla registrazione attraverso due passi: un allineamento di tipo "pairwise", o tra una coppia di viste 3D, con lo scopo di ottenere un preallineamento, e un processo di registrazione globale in una seconda fase. Il secondo passo applica un processo di raffinamento che coinvolge tutte le scansioni impiegate precedentemente. Questo approccio permette di avere una stima più precisa delle trasformazioni di rototraslazione che connettono tra loro i vari sistemi di riferimento in cui sono definite le scansioni, riducendo e distribuendo tra le medesime l'errore residuo di allineamento. La propagazione dell'errore di allineamento a coppie produce uno scostamento tra la prima scansione e l'ultima (quando queste sono successive e l'ultima si riallaccia alla prima), anche superiore a quella dell'errore proprio dello strumento quindi non trascurabile, a parte casi particolari dove il numero delle viste o l'errore di misura risultano contenuti (figura 15).

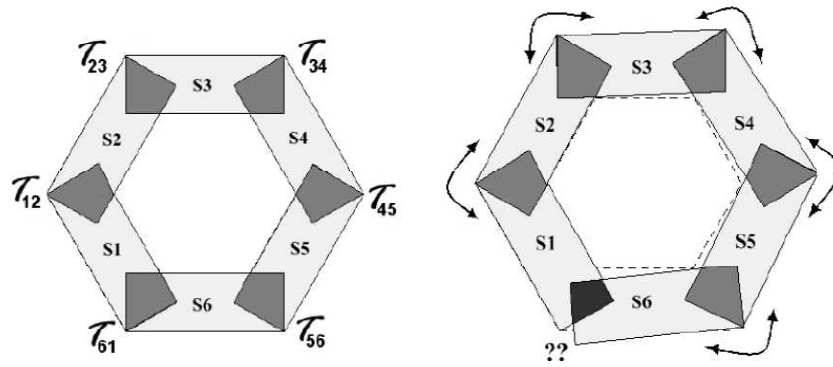


Figura 15: Effetto della propagazione dell'errore di registrazione pairwise, in particolare: (a) Posizione originale nello spazio delle 6 scansioni; (b) disallineamento residuo tra S_1 ed S_6

Quindi la registrazione globale permette una minimizzazione dell'errore tra tutte le scansioni, limitando questo effetto a cascata. Per definire le possibili corrispondenze tra coppie di scansioni i vari algoritmi di allineamento implementati fanno uso sostanzialmente di due diverse tipologie di entità: puntuali oppure forme geometriche complesse dette "shape descriptors". Quest' ultime, in realtà, non trovano applicazioni nei software commerciali, in quanto sono purtroppo oggetto di algoritmi sviluppati e utilizzati da gruppi di ricerca scientifica e pertanto esulano da questa trattazione.

4.4.1. ALLINEAMENTO MEDIANTE PRESEGNALIZZAZIONE.

Gli algoritmi di registrazione della maggior parte dei software utilizzano le entità puntuali per la determinazione delle corrispondenze. In particolare esse possono essere suddivise in:

- ✚ ARTIFICIALI: prodotte all'interno della scena per mezzo di elementi (target o marker) particolarmente riflettenti alla lunghezza d'onda della radiazione laser usata dallo strumento e punti facilmente riconoscibili dallo strumento. In alternativa possono essere utilizzate particolari forme geometriche (ad esempio piani) riconoscibili automaticamente dallo strumento laser.
- ✚ NATURALI: riconoscibili all'interno della scansione per mezzo di peculiarità morfologiche dell'oggetto scansionato (bordi, finestre, elementi riconoscibili). L'utilizzo dei target riflettenti come punti corrispondenti presegnalizzati sfrutta la capacità del laser scanner di misurare la riflettività dell'oggetto colpito che viene restituita sotto forma di dato di intensità. Particolare attenzione deve essere posta nel caso in cui si usufruisca di un elemento riflettente non specificatamente

realizzato per lo strumento laser impiegato, in quanto a causa delle differenti lunghezze d'onda dei diversi laser scanner si possono ottenere dei risultati inattesi e dannosi. Ad esempio il punto può risultare più vicino o più lontano dalla sua posizione reale (figura 16).

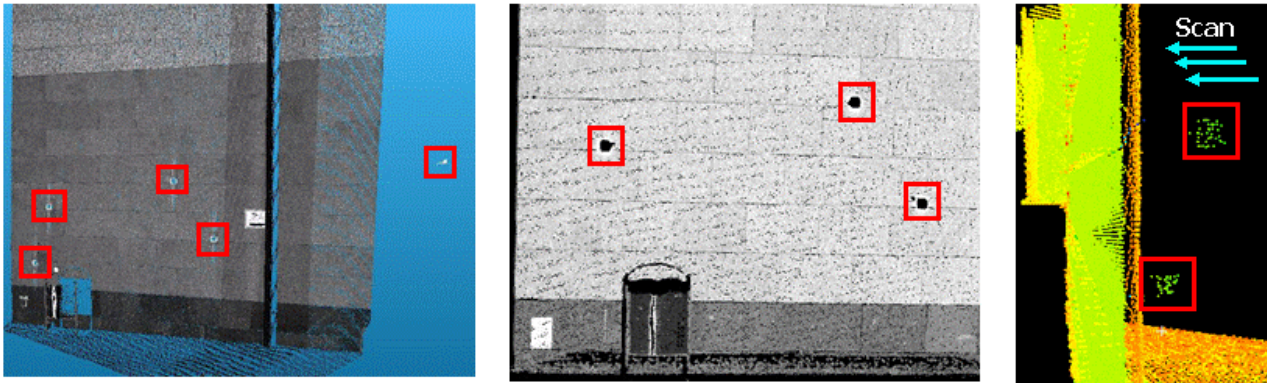


Figura 16: Comportamento di differenti TLS con target di tipo topografico. (a) Mensi GS 100; (b) Optech ILRIS 3D; (c) Leica HDS 3000

L'individuazione dei punti naturali (*features*), viene fatta attraverso un riconoscimento normale dei punti corrispondenti tra due scansioni effettuate dall'operatore. Le coordinate X,Y,Z di tali punti naturali sono utilizzate dal programma per calcolare ai minimi quadrati una prima stima della trasformazione che lega le due scansioni. L'algoritmo ICP è lo strumento computazionale, che ricalcolando i parametri della trasformazione, è preposto l'affinamento del risultato riducendo la distanza dei punti omologhi.

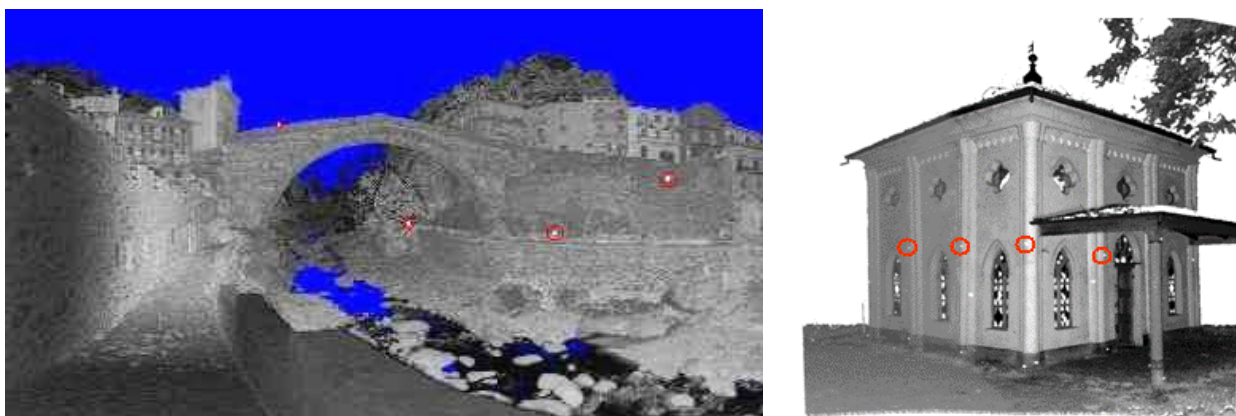


Figura 17: Esempi di utilizzo di marker retroriflettenti nell'ambito di rilievi con TLS (DITAG, Politecnico di Torino)

La scelta tra le due differenti tipologie di marker descritte comporta alcuni vantaggi e svantaggi. A vantaggio dei target artificiali possiamo dire che il loro impiego permette una riduzione sensibile della zona di sovrapposizione tra due scansioni successive necessarie per l'allineamento tramite uno strumento topografico, quale stazione totale o GPS. E' abbastanza semplice ottenere la georeferenziazione delle scansioni misurando la posizione dei marker. A svantaggio del loro impiego ci sono i seguenti aspetti:

- ✚ Il tempo necessario per il loro riconoscimento da parte del software (più elevato se tale operazione deve essere condotta manualmente anziché automaticamente);
- ✚ La necessità di dover dislocare i marker nella scena in modo che essi siano visibili da due o più stazioni consecutive. In alcuni casi, a seconda della tipologia di marker impiegati, essi devono essere affissi sull'oggetto di interesse, cosa non sempre possibile quando si tratta di beni a valenza storico - culturale. Il ricorso a features naturali presenta invece il vantaggio della possibilità di riconoscere il marker direttamente sulla nuvola di punti acquisita, senza quindi la necessità di dover accedere all'oggetto da rilevare per apporvi un target artificiale.

Questo approccio non richiede la progettazione del rilievo che tenga conto di come disporre i target sulla scena, quindi i tempi di presa sono ridotti. Alcuni degli svantaggi delle "features" naturali dipendono dal fatto che non sono sempre riconoscibili sulla scena, quindi, possono aumentare l'errore di registrazione in maniera sensibile. Inoltre le posizioni dei punti omologhi non sono note a priori, è necessaria una sovrapposizione minima del 30%.

4.4.2. ALGORITMO DI REGISTRAZIONE GLOBALE ICP.

Questa soluzione utilizzata per allineare più scansioni tra loro è stata proposta agli inizi degli anni novanta da Besl e McKay ed ha trovato largo impiego nel campo della "Computer Vision" e nelle applicazioni di *reverse engineering*. Il metodo originale denominato ICP (Iterative Closest Point), si può considerare il capostipite dei metodi attuali basato sull'allineamento automatico di porzioni di superfici di modelli 3D. L'ICP è una tecnica di calcolo iterativa, di impostazione tipicamente numerica, che non deriva dall'implementazione di un metodo analitico. Nell'ipotesi che due scansioni siano già approssimativamente ben allineate l'una all'altra, l'algoritmo si basa sulla seguente assunzione: i punti corrispondenti sono quelli più vicini tra i due dataset. La trasformazione T che lega la scansione \mathbf{U} alla scansione \mathbf{V} viene quindi determinata mediante minimizzazione del seguente funzionale quadratico:

$$\sum_{i=1}^N [(v_i - T(u_i))]^2 \quad (\text{Eq.17})$$

dove $V_i \in V$ e $U_i \in U$ rappresentano i punti corrispondenti, mentre T indica la rototraslazione 3D. In sostanza l'ICP consente di stimare la rototraslazione tra i sistemi di riferimento associati alle due scansioni U e V minimizzando la distanza tra i rispettivi punti omologhi. Per quanto riguarda l'aspetto strettamente computazionale, poiché la matrice di rototraslazione non è lineare rispetto agli angoli di rototraslazioni (ω, ϕ, κ) la stima dei 6 parametri della trasformazione T si traduce nella soluzione di un problema di minimizzazione non lineare. Allo scopo sono state proposte varie metodologie basate sull'utilizzo di tecniche standard di ottimizzazione non lineare (es. gradient descent, conjugate descent, metodo di Newton, Algoritmo di Levenberg - Marquardt) oppure sul ricorso a soluzioni in forma chiusa, come ad esempio la SVD (Singular Value Decomposition), il quaternione unitario, il quaternione duale o le matrici ortonormali. Per comprendere come operi il metodo si considerino gli insiemi di punti (u_i e v_i) costituenti le scansioni parziali e indipendenti U e V della superficie di un oggetto. Facendo riferimento alla figura 18 e supponendo che le due scansioni siano già pre-allineate, l'algoritmo procede iterativamente secondo i seguenti passi:

1. Per ogni punto $\{v_i\}$ di V si determina il punto più vicino appartenente alla vista U ;
2. Si calcolano la rotazione e la traslazione che minimizzano le distanze tra i due insiemi di punti così definiti;
3. Si aggiorna la posizione dei punti $\{v_i\}$ di V con i parametri così determinati;
4. Si itera l'intera procedura fino alla convergenza, definita in funzione di un valore di soglia per la distanza minima tra i punti delle due scansioni (inferiore a un certo limite prefissato).

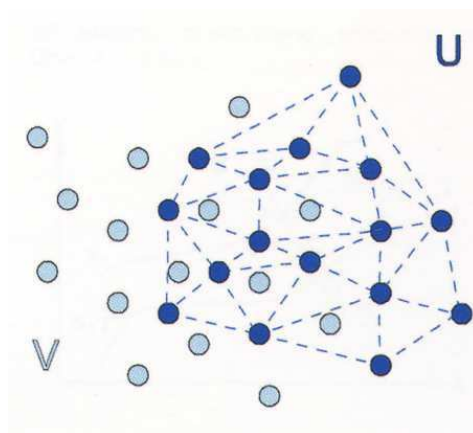


Figura 18: Aree di sovrapposizione tra scansione V e U

Questo algoritmo presenta indiscutibili vantaggi come quello di essere semplice, intuitivo e di facile realizzazione, di convergere sempre ad un minimo locale e di operare anche su nuvole di punti non filtrate dal rumore. Viceversa tra gli svantaggi il fatto che trattandosi di un metodo di calcolo iterativo è necessario un preallineamento manuale o per mezzo di "features" artificiali. Inoltre la convergenza è raggiunta solo se una delle superfici è un sottoinsieme dell'altra, in caso contrario punti di V che non hanno corrispondenza in U portano a risultati errati. In ultima analisi va menzionato il fatto che basandosi sulla minimizzazione delle distanze, l'efficacia dell'algoritmo dipende fortemente dal grado di variabilità della superficie dell'oggetto rilevato. In tal senso superfici piane o geometricamente regolari costituiscono un limite alla applicazione del metodo. L'algoritmo descritto ha subito nel tempo diverse evoluzioni indirizzate secondo differenti direzioni di ricerca: riduzione del numero di confronti e ricerca delle condizioni che spingessero l'algoritmo alla convergenza verso il minimo globale dell'errore di allineamento. Nel primo caso l'obiettivo si è tradotto nell'implementazione di strategie atte a ridurre il numero di punti da controllare, mentre nel secondo caso la ricerca scientifica si è indirizzata verso l'ampliamento delle condizioni iniziali nel senso di rilassare il vincolo sulla bontà del preallineamento delle scansioni. Le numerose varianti implementate possono essere classificate in base alle modifiche introdotte in uno più dei seguenti 6 passi che compongono l'algoritmo ICP:

- a) Selezione dei punti in una o entrambe le scansioni;
- b) Ricerca delle corrispondenze nell'altra scansione;
- c) Assegnare pesi appropriati alle corrispondenze trovate;
- d) Rimozione delle corrispondenze errate.

5. Definizione della funzione errore (metrica) da minimizzare;

6. Minimizzazione della metrica dell'errore.

Più in dettaglio, le soluzioni adottate in corrispondenza di ciascun passo sono riassumibili nel modo seguente:

1. Selezione sulle vista origine (es. U) di punti particolari (punti di controllo);
2. Determinazione dei punti corrispondenti sulla scansione destinazione (V);
3. Pesatura delle coppie di punti;
4. Verifica della correttezza delle coppie;

5. Definizione di una funzione errore;

6. Minimizzazione della funzione errore;

Una variante dell'ICP spesso implementazione nei "tool" di registrazione è il cosiddetto metodo punto - piano. Sviluppato da Chen e Medioni nel 1992, introduce una modifica sostanziale rispetto all'ICP in quanto una delle due viste viene approssimata localmente con un piano. Con tale accorgimento l'allineamento "pairwise" risulta migliorato dato che nella ricerca delle corrispondenze viene utilizzata una rappresentazione continua a tratti (piani) di una delle due superfici rilevate, anziché una sua versione discretizzata (nuvola dei punti). Un ulteriore vantaggio rispetto all'ICP è rappresentato dalla possibilità di registrare tra loro coppie di scansioni anche in presenza di overlap parziali. Data una coppia di scansioni A e B, l'algoritmo inizialmente trasforma una delle nuvole di punti in una rappresentazione superficiale (es. S_A) campionando la vista a passo costante, riducendo così il numero di punti utilizzati per il calcolo. Successivamente ad ogni interazione, per ciascun punto p_i della nuvola N_A viene tracciata la normale alla superficie S_A , tale normale interseca la nuvola N_B in un punto q'_i . Successivamente l'intorno di q'_i sulla superficie S_B viene approssimato con il piano tangente S_i , il punto più vicino (q_i) viene quindi calcolato come intersezione fra la retta normale n_i e tale piano (Figure 19 e 20).

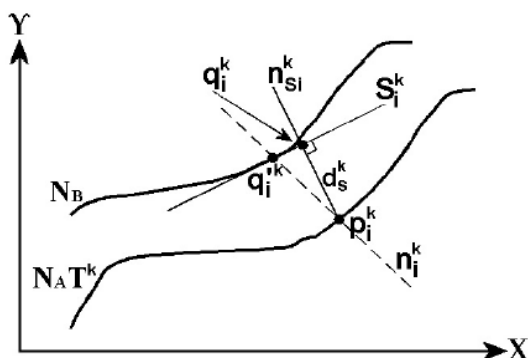


Figura 19: Metodo punto-piano proposto da Chen & Medioni.



Figura 20: Confronto tra metodo punto-punto (a) e metodo punto-piano (b).

5. ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI TRAMITE LASERSCANNER TERRESTRE.

5.1. ESTRAZIONE DELLE MISURE E DELLE QUOTE DAL MODELLO 3D.

Dopo aver creato il modello 3D mediante l'allineamento delle varie scansioni si passa alla fase di estrazione delle misure e delle quote inerenti l'intero edificio. Questa operazione è stata condotta in due diversi ambienti software: Cyclone ed Autocad (versione 14).

Il primo è stato utilizzato per isolare ciascuna facciata del modello tridimensionale in modo tale da poterne estrarre un'immagine bidimensionale dettagliata (ortofoto) che è stata successivamente esportata in Autocad per l'esecuzione delle misure e delle quotature richieste dalla circolare del Settore Edilizia Privata del comune di Padova, descritta nel precedente capitolo 3. A tale scopo è necessario seguire una specifica procedura per poter inserire l'ortofoto nella finestra Cad nella posizione e scala corrette. In particolare, in tale ambiente si crea inizialmente un rettangolo posizionato all'origine degli assi x e y, opportunamente dimensionato (in base al fattore di scala e alla risoluzione con la quale l'immagine è stata esportata) all'interno del quale viene inserita l'ortofoto in oggetto, che risulterà così nella giusta scala di misura. Le informazioni necessarie per il corretto dimensionamento del rettangolo e per la scalatura dell'ortofoto impostata sono contenute all'interno di un file di testo in formato TWF, creato dal software Cyclone in concomitanza con l'esportazione dell'ortofoto stessa in formato TIFF. All'interno del file TWF le informazioni relative all'ortofoto sono disposte in sequenza secondo una precisa struttura, come riportato in tabella 3.

Meters
<u>0.00601243</u>
90.10268670
0.01534246
-106.99544362 -9.30829940
-3.13174043
-6.72122965

Tabella 3: Esempio di dati presenti nel file TWF relativo a ciascuna ortofoto

In particolare, il dato riportato in grassetto in tabella 3 rappresenta il fattore di scala, parametro per il quale vanno moltiplicate le dimensioni (numero di pixel) orizzontale e verticale dell'immagine TIFF al fine di recuperare in Cad il giusto dimensionamento della facciata in oggetto in unità metriche. Il rettangolo destinato a contenere le ortofoto viene quindi creato partendo dallo spigolo inferiore sinistro coincidente con l'origine degli assi x,y,z (l'origine avrà perciò coordinate 0,0,0), per poi essere esteso lungo gli assi x ed y di una quantità pari ai prodotti ($\Delta x \cdot \text{scala}$) e ($\Delta y \cdot \text{scala}$) rispettivamente.

Costruita la cornice si posiziona l'immagine al suo interno, tramite il comando "Importa" presente in Autocad, e si ottiene l'ortofoto perfettamente in scala. Successivamente a questa fase, tramite il comando "quotatura lineare" si passa all'inserimento delle quote, nel foglio di lavoro CAD, inerenti all'immagine. Di seguito si riportano le ortofoto estrapolate dal modello 3D in esame con le relative quote dell'edificio, evidenziando la relativa quota del piano strada che, come si può vedere dalle ortofoto, risulta essere posizionata più in alto del piano campagna. Questo perché l'abitazione oggetto di intervento presenta una quota campagna negativa rispetto al piano stradale.

LA quota 0, così come la quota di riferimento del piano campagna sono state calcolate facendo riferimento ad ogni singola facciata, in particolare per ognuna di esse si è impostata una quota 0, mentre la quota stradale è stata calcolata tramite il posizionamento di un target su di un cavalletto posto verticalmente sul piano strada, del quale abbiamo misurato la posizione del rispettivo centro con il TLS e si è quindi derivata la quota del piano strada in base alle caratteristiche del sostegno utilizzato.

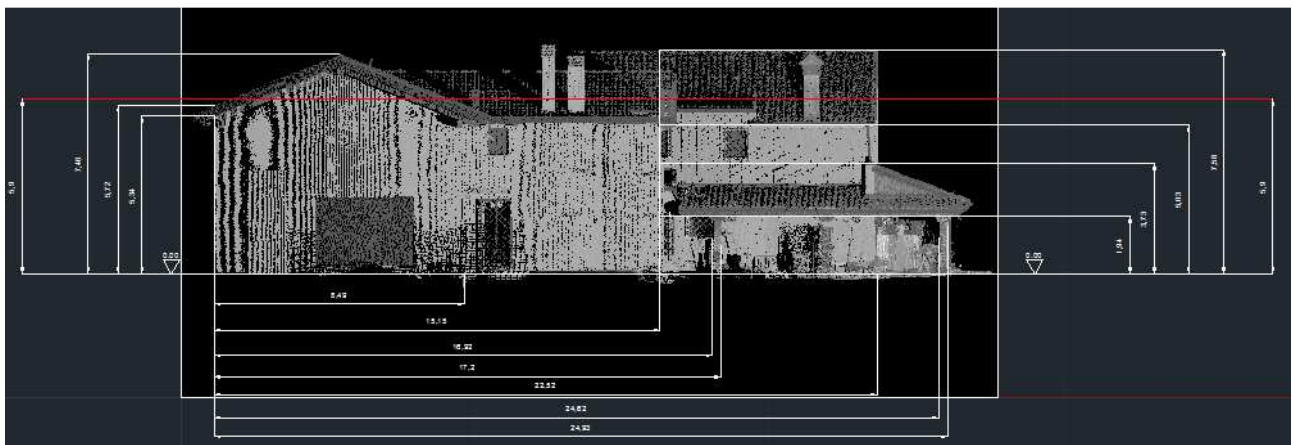


Figura 21: Ortofoto del Prospetto Nord con relative quote



Figura 22: Ortofoto del Prospetto Sud con relative quote



Figura 23: Ortofoto del Prospetto Est con relative quote



Figura 24: Ortofoto del Prospetto Ovest con relative quote

5.2. ESTRAZIONE DELLE ORTOFOTO DAL MODELLO 3D.

Negli interventi di restauro è noto come la documentazione fotografica rappresenti uno strumento principe su cui si basano gli interventi volti al recupero del bene in oggetto. La fotografia è l'elemento che meglio documenta lo stato in cui versa l'edificio in termini di grado di conservazione e di stato di deterioramento; essa quindi costituisce anche il miglior strumento attraverso il quale studiare soluzioni congrue agli interventi di restauro. I moderni strumenti TLS generalmente integrano già al loro interno una fotocamera a colori di risoluzione media (qualche Megapixel). In alcuni casi i produttori di TLS consentono di incrementare la capacità di acquisizione fotografica del laser scanner attraverso l'installazione di una fotocamera esterna ad alta risoluzione (maggiore di 10 megapixel) mediante appositi supporti accessori. Grazie ai valori RGB dei pixel delle immagini è possibile colorare i singoli punti delle scansioni laser e "texturizzare" le superfici da esse ottenute. Dal punto di vista analitico l'associazione tra colore RGB e singolo dato laser si basa sull'applicazione delle seguenti equazioni di *col linearità* (Eq.18). Queste esprimono la relazione tra le coordinate assolute X,Y,Z di un punto – oggetto e le coordinate x,y del corrispondente punti - immagine, mediante i parametri di orientamento esterno X, Y, Z, ω , φ , κ , della camera:

$$\begin{aligned}x &= -c \frac{R_{11}(X - X_0) + R_{12}(Y - Y_0) + R_{13}(Z - Z_0)}{R_{31}(X - X_0) + R_{32}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} + x_0 \\y &= -c \frac{R_{21}(X - X_0) + R_{22}(Y - Y_0) + R_{23}(Z - Z_0)}{R_{31}(X - X_0) + R_{32}(Y - Y_0) + R_{33}(Z - Z_0)} + y_0\end{aligned}\tag{Eq.18}$$

In tale equazione sono rappresentate in verde le entità note, in blu quelle misurate e in rosso quelle incognite. Nel caso di sistema TLS i parametri di orientamento interno (x_0, y_0, c) di distorsione dell'obiettivo e di orientamento esterno della fotocamera (rototraslazione fra il sistema di riferimento interno della camera e quello interno del TLS) sono calcolati a seguito di una specifica procedura di calibrazione. Una delle possibilità che offerte dal software *Cyclone*, all'interno del *Model Space*, è quella di estrarre il dato colore direttamente dalla nuvola dei punti mappata e quindi di ottenere la fotografia proiettata ortogonalmente su un piano (ortofoto). Grazie all'integrazione nei moderni TLS di un compensatore biassiale, risulta molto semplice (agevole) osservare la verticalità dello strumento laser in campagna. Questa caratteristica consente di facilitare la procedura di estrazione di un'ortofoto direttamente dalla nuvola di punti. Essendo infatti lo strumento posto in verticale (livellato) attraverso opportuni comandi di visualizzazione è possibile orientare il modello 3D in modo tale che le superfici di interesse, delle quali si desidera creare ortofoto, siano disposte correttamente in posizione ortogonale rispetto al punto di vista dell'osservatore. L'ampiezza dell'immagine verrà imposta da una finestra di dialogo che vi si aprirà subito dopo. A questo punto il software genererà un file immagine di tipo "tiff" ed un file di testo tipo TFW. Quest'ultimo tiene i dati relativi al posizionamento

dell'immagine rispetto al sistema di riferimento della nuvola dei punti nel *Model Space*, in particolare il fattore di scala. Tramite il file TFW è quindi possibile riposizionare e riscalarla correttamente l'ortofoto in ambiente CAD ed estrarre quindi da essa profili bidimensionali con contenuto metrico. L'esperienza ha mostrato che, affinché si possa utilizzare il dato fotografico ottenuto direttamente dallo strumento senza dover ricorrere ad alcuna operazione di correzione/miglioramento è opportuno che le prese nell'ambiente vengano effettuate in tempi non troppo distanti tra loro; questo è ancora più vero soprattutto quando la scena che si vuole ritrarre nell'ortofoto è descritta da più scansioni. Infatti le due foto acquisite in tempi troppo diversi nell'arco della stessa giornata possono rasentare significative variazioni di luminosità dell'ambiente circostante. Tale variazione comporta a sua volta un cambiamento notevole dell'esposizione della macchina da presa e quindi la generazione di due fotogrammi cromaticamente diversi tra loro che vengono mappati su porzioni adiacenti della nuvola. La diversità cromatica può dar luogo ad un'ortofoto qualitativamente scadente. Quando si visualizza un prospetto dal *Model Space*, nelle condizioni di presa descritte sopra, in genere si notano degli scostamenti di colore eccessivi che compromettono la visualizzazione globale di tale elaborato e dunque dell'ortofoto. Ovvio a questa situazione è possibile attraverso l'utilizzo di una camera esterna. Attraverso il software *Cyclone*, sempre all'interno del *Model Space*, si possono introdurre delle foto fatte attraverso una camera esterna, in quanto con il suo utilizzo si può sia avere foto a risoluzione maggiore sia un accurato controllo dell'esposizione della fotocamera all'atto della presa. Questa possibilità che andremo adesso a discutere si scontra con il concetto di spedività e di utilizzo monostrumentale che abbiamo ampiamente descritto negli scopi che si perseguono con questo lavoro. In effetti, possiamo estrarre da questo strumento le immagini fotografiche, correggerle per fare in modo che siano coerenti con il risultato da noi voluto e infine rimapparle sulle nuvole dei punti. La gestione delle immagini e delle foto che possono essere mappate sulla foto è gestito all'interno del software *Model Space* in *Edit Object, Appearance*, attraverso *Texture Map Browser*. Una volta aperto questo menù possono essere importate le nuove foto da mappare alla nuvola dei punti. Al fine di conseguire una corretta mappatura è indispensabile collimare punti omologhi tra nuvola dei punti e immagine fotografica, così da consentire al software di risalire ai parametri di rototraslazione che consentono la mappatura. In funzione delle foto e della loro tipologia sono necessari diversi punti omologhi: otto se la foto è prospettica, cinque se è un'ortofoto, tre punti su tutte le sei facce della cubica. Qualora si utilizzi una macchina esterna per ottenere le foto da mappare sulla nuvola è bene che questa sia installata su una testa sferica in modo da far coincidere il fuoco della macchina da presa con il centro di presa dello strumento integrato sul laser scanner. Questo perché sia la foto che la nuvola dei punti sono un continuum, per cui la distanza tra il fuoco ed il centro dello strumento determina il risultato ultimo della mappatura della foto sulla nuvola. Infatti utilizzando una camera coassiale, e quindi, non coincidendo i due centri il risultato non è ottimale: alcune aree della nuvola dove il dato RGB non è stato acquisito vengono colorate in modo uniforme. L'ortofoto viene spesso utilizzata per la ricostruzione di un prospetto attraverso la vettorializzazione manuale della stessa in un ambiente CAD, ai fini del restauro. Questo strumento di restituzione permette di individuare gli interventi da effettuare sulle parti visibili dalla foto: difetti cromatici del prospetto, presenza di muschio,

deterioramento materico e di supportarli con gli strumenti vettoriali. Và inoltre sottolineato come l'ortofoto, direttamente ottenibile dalle nuvole di punti attraverso i software messi a disposizione dai produttori di strumentazione TLS, nei casi tradizionali necessitano di una trattazione indipendente. Infatti produrre un'ortofoto per una restituzione tradizionale richiede l'impiego di software per il raddrizzamento, l'esportazione e la scalatura in ambiente CAD e la successiva restituzione. Nel caso del software di *Cyclone*, è anche possibile utilizzare l'ortofoto in modalità "false colour", quindi con le indicazioni di riflettanza. Come già detto questo tipo di informazione rispetto al colore RGB proveniente dalla camera, permette di distinguere in maniera più accurata (nel caso di acquisizioni fotografiche mal esposte) le colorazioni del prospetto e le discontinuità tra i materiali. Di seguito si riportano le ortofoto relative all'abitazione in oggetto estratte dal modello 3D.



Figura 25: Ortofoto del profilo Nord



Figura 26: Ortofoto del profilo Sud



Figura 27: Ortofoto del profilo Est



Figura 28: Ortofoto del profilo Ovest

6. CONCLUSIONI

Dai risultati presentati in questo lavoro di tesi si può evincere una serie di importanti indicazioni per gli operatori interessati all'impiego della tecnica laser scanning terrestre ai fini della ristrutturazione edilizia.

Ad esempio considerando le operazioni di misura eseguite per il rilievo di un'abitazione civile, si può ragionevolmente supporre che, a parità di strumentazione impiegata, l'acquisizione completa di una struttura analoga possa richiedere un arco di tempo notevole, in quanto gli operatori devono effettuare più stazionamenti per poter rilevare tutte le facciate dell'edificio utili ad ottenere, in fase di elaborazione, il corretto allineamento finale tra esse. Il numero dei stazionamenti dipende dalla complessità della facciata da rilevare, dai vari piani costituenti l'edificio nel suo complesso e dai particolari costruttivi ed architettonici presenti nello stesso. In tal caso, se l'edificio o parti di esso si trovano su diversi livelli potrebbe anche essere necessario utilizzare un cestello elevatore per poter rilevare correttamente il tutto, il che comporterebbe maggiori spese da parte del committente dei lavori, oltre a richiedere un tempo molto maggiore per eseguire le varie scansioni. A tal proposito viene spontanea la comparazione della tecnologia TLS con i metodi classici di rilievo, come stazione totale e fotogrammetria terrestre, utilizzati dai professionisti con l'obiettivo finale di quotare l'intero edificio oggetto del rilievo.

Si evince da subito che la tecnologia laser scanner offre un risultato più immediato, completo e con precisione maggiore rispetto alla strumentazione precedentemente

adottata, in quanto da ogni punto di stazionamento è possibile acquisire l'intera "forma" dell'edificio, le posizioni dei target posti sulla scena da rilevare ed inoltre l'immagine fotografica dettagliata della stessa scansione.

Sostanzialmente le principali differenze tra laser scanner e strumentazione classica (stazione totale) sono:

- Il laser misura senza prisma riflettente, quindi ogni elemento è misurabile nella sua normalità;
- La velocità di acquisizione dei dati nel laser è molto maggiore, e quindi si possono immagazzinare milioni di punti al secondo;
- Il laser scanner, oltre ad acquisire le tre coordinate di posizione (X,Y,Z) è in grado di acquisire anche informazioni sul colore e sulla riflettanza dell'oggetto scansionato;
- La misura con laser scanner è automatica e "non intelligente", non è possibile quindi imporre il rilievo delle linee di discontinuità degli oggetti rilevati;
- Assoluta ininfluenza delle condizioni d'illuminazione circostanti alla scena da rilevare;
- Uniformità del dato acquisito.

Per contro la mole di dati da gestire è notevole e necessita di un processo di elaborazione abbastanza impegnativo, anche se le possibilità offerte dall'hardware e dal software odierno permettono un'elaborazione veloce; inoltre se la campagna di rilievo non è stata adeguatamente pianificata ci si può trovare con una mole di dati notevole e, per certi versi, inutile.

Il Settore Edilizia Privata del Comune di Padova, nella delibera del 25/09/2012 indicante le modalità di esecuzione dei rilievi con tecnologia Laser scanner, richiedeva un rilievo con una risoluzione spaziale minima (interdistanza tra coppie di punti adiacenti) pari a 5 millimetri. Diversamente, in questo lavoro di tesi si è scelto di effettuare il rilievo con una risoluzione inferiore, ovvero con un passo di campionamento delle facciate pari a 1 centimetro. Tale valore è risultato infatti sufficiente per garantire il livello di dettaglio minimo necessario per gli scopi del rilievo (quotatura delle varie parti dell'edificio) e ha consentito di ridurre i tempi del rilievo e quindi conseguentemente anche i costi che un ipotetico committente dei lavori dovrebbe sostenere.

Analizzando quanto sopra in merito al rilievo con sistema laser scanner si può evincere che tale metodologia di rilievo risulta essere sia più completa e precisa rispetto alla tecnologia classica (stazione totale), però, allo stesso tempo risulta essere più dispendiosa in termini economici, in quanto presenta una fase di acquisizione piuttosto lunga, in quanto si devono fare più stazionamenti per acquisire ogni facciata dell'edificio oggetto di rilievo, nonché i

vari particolari architettonici ad esso annessi. Oltre a ciò, il dato acquisito tramite tecnologia TLS prevede un'elaborazione molto più complessa rispetto alla precedente tecnologia, in quanto occorre pulire, tramite software appropriato (Cyclone ad esempio), ciascuna scansione da tutti gli elementi di disturbo presenti in fase di acquisizione (alberi, ramaglie, cespugli, oggetti vari presenti nelle vicinanze dell'edificio) per poi poterla successivamente allineare alle altre, ottenendo come prodotto finale il rilievo 3D dell'edificio in oggetto. Questa procedura richiede innanzitutto personale esperto nell'utilizzo di software per l'elaborazione dei dati acquisiti, ed inoltre una tempistica variabile tra i quattro ed i sei giorni lavorativi per poter completare tutti i processi di restituzione del rilievo 3D. Questo risulta essere uno svantaggio dal punto di vista economico, in quanto il committente deve accollarsi non solo le spese della fase di rilievo, ma anche quelle di post elaborazione che, rispetto ai metodi tradizionalmente utilizzati (stazione totale) risultano essere di maggiore impatto economico a causa della maggiore quantità di dati da elaborare, il che comporta una tempistica molto superiore da parte del personale tecnico impegnato nella fase di elaborazione. Tale procedura di rilievo ha comunque il vantaggio di sostituire la perizia giurata del tecnico abilitato, in quanto assicura una garanzia di elevatissima precisione nelle misure e quindi la certezza di una congruità dello stato di fatto durante l'iter inerente le domande delle pratiche autorizzative.

7. BIBLIOGRAFIA

Besl, Paul J.; N.D. McKay (1992). "A Method for Registration of 3-D Shapes". *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society)

Chen, Yang; Gerard Medioni (1991). "Object modelling by registration of multiple range images". *Image Vision Comput.* (Newton, MA, USA: Butterworth-Heinemann)

Leica Geosystems, Leica C10 system field manual. <http://www.leica-geosystems.it>

Settore Edilizia privata, Comune di Padova 2012. Promozione delle metodologie di rilievo mediante laser scanner 3D. <http://www.padovanet.it>

Bornaz L., 2004. La tecnica del Laser Scanning terrestre, Atti Convegno CISM, Udine.

Caroti G., Pucci B., 2004. Laser Terrestre per documentare attività di cantiere, Atti 6a Conferenza nazionale ASITA, Roma.

Codevintec, Milano. Introduzione ai sistemi Laser Scanner: come scegliere lo strumento più adatto. <http://www.codevintec.it>

Fangi G., 1995. Note di Fotogrammetria, CLUA Edizioni, Ancona.

Sacerdote F., Tucci G., 2007. Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio, Alinea Editrice.