

Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento D.I.S.T.A.R.T.

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile

Indirizzo: Strutture

Insegnamento: TELERILEVAMENTO LS

**LA TECNICA DEL LASER A SCANSIONE
NEL RILEVAMENTO DI STRUTTURE:
UN CASO DI STUDIO**

Tesi di Laurea di:
Gianmarco BASSANELLO

Relatore:
Prof. Gabriele BITELLI

Correlatori:
Prof. Luca VITTUARI
Ing. Valentina Alena GIRELLI

Sessione II

Anno Accademico 2006/07

- Indice degli argomenti -

Introduzione alla Tesi.....	3
I. Tecniche e metodologie di rilievo applicate ai Beni Culturali	5
1.1 Caratteristiche del rilievo	5
1.2 Strumenti e prodotti derivabili	6
1.2.1 Il telerilevamento.....	8
1.2.2 Il laser a scansione terrestre	9
1.2.3 La strumentazione topografica elettronica.....	13
1.2.4 Il GPS	14
1.2.5 La fotogrammetria.....	16
1.2.6 L'ortofoto.....	22
II. I sistemi laser a scansione	30
2.1 La luce e le radiazioni elettromagnetiche.....	32
2.1.1 Assorbimento ed emissione.....	33
2.2 Il laser e i suoi componenti.....	33
2.2.1 Cavità risonante.....	34
2.2.2 Pompaggio.....	34
2.3 Tipologie di laser	35
2.3.1 Classificazione in base al materiale utilizzato	36
2.3.2 Classificazione in base ai livelli di radiazione emergente	41
2.4 Applicazioni laser.....	43
2.5 La tecnica del laser a scansione.....	46
2.6 Grandezze radiometriche.....	47
2.7 Interazione della radiazione con le superfici naturali.....	48
2.8 Il problema della divergenza del raggio laser	52
2.9 Sensori laser scanner terrestri.....	52
2.10 Laser scanner distanziometrici	53
2.11 Distanziometri laser	54
2.11.1 Distanziometri ad impulsi	55
2.11.2 Distanziometri a misura di fase.....	59
2.12 Laser scanner triangolatori	63
2.13 Formati per lo scambio di dati.....	67
2.13.1 Formato ASCII.....	68
2.13.2 Formato binario.....	68
2.14 Formati esistenti sul mercato.....	69
2.15 Confronto delle precisioni tra strumenti laser diversi	70
2.16 Precisioni ottenibili da strumenti laser a scansione.....	72

III. Il rilievo della Sala dei Carracci a Bologna	76
3. 1 Palazzo Magnani e il Salone D'onore.....	77
3. 2 Laser scanner LS 880 e software Faro Scene.....	86
3. 3 Procedure di rilievo e data processing.....	89
3. 4 Generazione della nube di punti.....	92
3. 5 Pretrattamento e filtraggio.....	95
IV. Processamento dei dati e generazione dei prodotti finali	99
4. 1 Generazione delle superfici	102
4. 2 Allineamento della nube.....	108
4. 2.1 Allineamento indiretto	109
4. 2.2 Allineamento diretto.....	109
4. 3 Laser scanner e fotogrammetria	121
4. 3.1 Confronto tra fotogrammetria e laser a scansione	121
4. 3.2 Utilizzo integrato di fotogrammetria e laser a scansione	124
4. 4 Texture mapping.....	128
4. 5 Considerazioni sulla segmentazione dei dati	135
4. 6 Rilievo, analisi e rappresentazione multiscala	136
4. 7 Potenzialità del laser a scansione nello studio e nel monitoraggio di dissesti strutturali.....	139
Conclusioni	146
Bibliografia	149

INTRODUZIONE

Le soluzioni tecnologiche, rese oggi disponibili dalle discipline della moderna Geomatica, offrono opportunità di grande interesse per il rilevamento nel settore dei Beni Culturali, sia per quanto riguarda il momento primario del rilievo, cioè la fase di acquisizione del dato metrico, sia per quanto concerne la questione della rappresentazione per oggetti di interesse archeologico, artistico e architettonico.

La tesi svolta è prettamente applicata a un singolo caso di studio, ma è importante sottolineare che le operazioni di rilievo non possono essere racchiuse in schemi convenzionali e metodologie standardizzate, ogni esperienza presenta proprie caratteristiche e peculiarità che la rendono interessante ed unica.

Gli scopi della tesi sono stati molteplici, ma possono essere ricondotti alla valutazione delle potenzialità, dell'affidabilità e delle problematiche connesse al rilievo laser applicato alle strutture. Lo strumento utilizzato Laser scanner LS 880, prodotto dalla Faro, è innovativo e molto affascinante per velocità, precisione e facilità di utilizzo.

Il soggetto del rilievo, il Salone D'Onore di Palazzo Magnani, racchiude tantissimi particolari realizzati a scale diverse molto difficili da rilevare. La difficoltà esecutiva di questo rilievo consente di analizzare, su varie applicazioni, le potenzialità dello strumento.

La tesi è stata suddivisa in quattro capitoli: i primi due sono un'introduzione alle metodologie di rilievo applicate ai Beni culturali e alla tecnologia laser; i rimanenti descrivono le applicazioni che hanno portato alla generazione dei prodotti finali.

Il primo capitolo vuole essere una panoramica generale che sottolinei vantaggi e svantaggi propri delle tecniche che consentono il rilievo dei Beni Culturali.

Il secondo capitolo presenta una panoramica applicativa della tecnologia laser: vengono approfondite le strumentazioni presenti sul mercato, i problemi pratici del rilievo attraverso strumentazione laser e le problematiche relative alle precisioni raggiungibili da questi strumenti così innovativi.

La seconda parte della tesi sposta l'attenzione su problematiche più applicative, entra nel merito del rilievo eseguito, della strumentazione utilizzata e le operazioni svolte sul pretrattamento dei dati.

L'ultimo capitolo segue le fasi classiche del progetto che a partire dal rilievo porta alla generazione dei prodotti finali. Ampio spazio è dedicato ai problemi riscontrati e alle soluzioni che sono state trovate. La parte finale dell'ultimo capitolo, oltre ai prodotti finali, vuole fornire un confronto tra le tecniche della fotogrammetria e del laser a scansione valutandole sia separatamente, sia in un utilizzo integrato che, sfruttando pregi e difetti di ciascuna, ne esalti la complementarità.

Infine sono stati eseguiti due rilievi di maggiore dettaglio: uno su un particolare del soffitto a cassettoni del salone d'onore, l'altro su una fessurazione presente sul muro esterno della chiesa di San. Giacomo a Bologna. I due casi di studio sono stati finalizzati alla valutazione delle precisioni dello stesso strumento a scale diverse. Il particolare del soffitto è volto solamente a raffigurare la diversa quantità di informazione disponibile con risoluzione diversa. Il caso della fessurazione ha consentito, seppur analizzando dati derivanti da una sola stazione, di analizzare le performance del sistema a scansione nel rilievo alla massima risoluzione, deducendo per esempio il valore della profondità della fessura, successivamente confrontato con quello reale.

CAPITOLO I

TECNICHE E METODOLOGIE DI RILIEVO APPLICATE AI BENI CULTURALI

L'Italia gode di un'enorme ricchezza nell'ambito dei beni culturali; la lunga e fiorente storia artistica ed intellettuale che il nostro paese ha vissuto ha consentito a ogni città, paese o grande capoluogo, di poter testimoniare con resti concreti e variegati la storia e le vicende accadute nei secoli passati. I beni culturali presenti sul territorio possono variare dalle maestose cattedrali a piccolo affreschi, da scavi archeologici di enormi proporzioni a un singolo reperto. Esistono così tante testimonianze storico-artistiche che meritano di essere monitorate, valorizzate e conservate.

Per eseguire questo compito così delicato entrano in scena le discipline geotopo-cartografiche: esse infatti permettono di descrivere sia visivamente, utilizzando la fotogrammetria, sia metricamente ogni tipo di oggetto, dalle forme e dimensioni più svariate. Con tecniche e metodologie appropriate di rilievo e precisioni altrettanto diverse è possibile rilevare dal più piccolo reperto archeologico alla maestosa cattedrale (Bitelli, 2002).

1.1 CARATTERISTICHE DEL RILIEVO

Il rilevamento dei beni culturali presenta caratteristiche specifiche che talvolta non possono essere racchiusi in schemi convenzionali e standardizzati. La forte variabilità degli oggetti da rilevare e delle metodologie utilizzabili possono generare infinite combinazioni, che devono essere scelte in base all'utilizzo del prodotto finale. Caratteristica importante del rilievo dei beni culturali è che spesso possiedono dimensioni

molto variabili: si può andare dal minuscolo reperto al grande edificio storico; allo stesso tempo gigantesche costruzioni architettoniche possono contenere anche piccole opere d'arte importanti e degne di essere rilevate e conservate. In questi casi, vista la grande difformità di dimensioni, si devono necessariamente utilizzare approcci di rilievo gerarchici e multiscala, in cui diversi oggetti vengono rilevati separatamente ed utilizzando anche strumenti totalmente differenti fra loro; nei diversi rilievi si ottengono così precisioni diverse e si hanno diverse tipologie di prodotti finali, in sistemi di riferimento non sempre omogenei tra loro. A questo punto è assolutamente necessario trovare un modo per georeferenziare in un unico sistema i diversi prodotti metrici ottenuti, in modo che essi possano dialogare fra loro. Questo assemblaggio può essere talvolta operato mediante la conoscenza di più punti omologhi di cui sono note le coordinate in tutti i sistemi di riferimento adottati per i diversi rilievi. Altro aspetto è quello dell'accuratezza richiesta al rilievo. La precisione dipende moltissimo dall'uso che vogliamo fare del prodotto commissionato: può essere non molto elevata quando il primo obiettivo sia l'efficacia nella presentazione e visualizzazione dell'oggetto, d'altra parte l'utenza specialistica può invece richiedere requisiti molto stringenti in termini di risoluzione ed accuratezza.

L'integrazione fra i vari dati e fra i diversi strumenti di rilievo consentita anche dal formato digitale dei dati oggi prodotti, sembra essere la pratica più efficace ed all'avanguardia, e con ogni probabilità in un prossimo futuro potrà divenire prassi comune in questo ambito (Bitelli et al., 2005).

1.2 STRUMENTI E PRODOTTI DERIVABILI

Allo stato dell'arte nel rilevamento non esiste uno strumento geo-topo-cartografico moderno che non possa essere impiegato nel settore dei beni culturali, ma di certo alcuni sono più idonei a risolvere i problemi insiti nel rilevamento di questi oggetti.

Generalmente i prodotti richiesti sono:

- ✓ **mappe raster georeferenziate**, a scopo di visualizzazione, interpretazione diretta o classificazione tematica per ambiti di ampiezza medio-grande, per esempio all'interno di applicazioni GIS;
- ✓ **cartografia numerica** di aree con dimensionalità 2.5D ed eventualmente in 3D;
- ✓ **rappresentazioni in forma vettoriale di oggetti** (mediante prospetti, sezioni, profili, alzati, piante, ecc) da trattare all'interno di sistemi CAD;
- ✓ **modelli tridimensionali di oggetti**
- ✓ modelli digitali del terreno (**DTM**) e delle superfici (**DSM**) per visualizzazione, studi di visibilità, analisi ambientali, ecc...
- ✓ **rappresentazioni in realtà virtuale e visuale.**



Figura 1 - Strumentazione applicate alle diverse scale di analisi per un intervento nell'ambito dei Beni Culturali

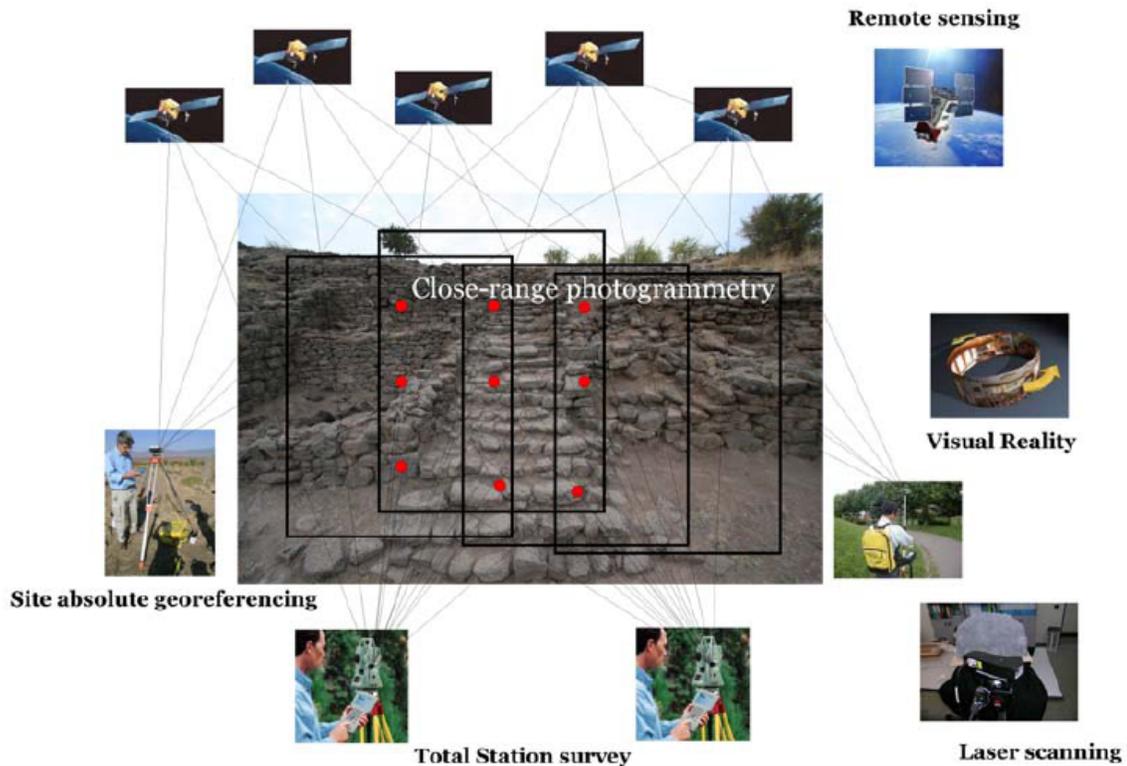


Figura 2: Schema della possibile integrazione tra differenti tecniche geomatiche per il rilievo di un sito archeologico.

1.2.1 TECNICHE DI RILIEVO SENZA CONTATTO CON L'OGGETTO

Anche se comunemente il termine telerilevamento viene oggi utilizzato soprattutto per l'acquisizione di immagini da satellite, l'etimologia della parola consentirebbe di indicare come telerilevamento, in senso lato, tutte le tecniche di rilevamento a distanza, che non richiedono quindi contatto con l'oggetto. Questa caratteristica è indubbiamente di notevole interesse per il settore dei beni culturali, dove sono utili e spesso necessarie metodologie di rilievo che permettano di ottenere dati metrici dell'oggetto senza alcun contatto fisico con lo stesso (limitando sensibilmente i rischi di danneggiamento e riducendo le interferenze con altre attività condotte su di esso, si pensi al caso di uno scavo archeologico). Le tecniche più utilizzate in questo campo sono: il **laser a scansione**, la **fotogrammetria diretta** e anche la **total station**, con l'utilizzo di un distanziometro ad impulsi. Queste metodologie di rilievo a distanza sono in effetti l'unica tipologia di

rilievo che può essere utilizzata su beni di notevole pregio, che per ovvi motivi non possono essere in alcun modo intaccati e manomessi; in questi casi le tecniche del telerilevamento sono la soluzione ottimale.

Il rilievo laser a scansione ha caratteristiche tipiche del telerilevamento, ad esempio la distanza alla quale si opera dall'oggetto. Per rispettare strettamente il vincolo dell'assenza di contatto e della totale non interferenza, in alcune applicazioni particolarmente delicate possono essere utilizzati solamente determinati tipi di laser.

La tecnica del telerilevamento ha un vastissimo campo nell'acquisizione ed elaborazione di immagini satellitari. I dati così ottenuti derivano dalla ricezione del segnale elettromagnetico in bande diverse (dal visibile all'infrarosso alle microonde) e con sensori di diverso tipo (passivo, nel caso di visibile e infrarosso, o attivo nel caso del radar). Dati acquisiti in porzioni diverse dello spettro, e dunque corrispondenti a bande diverse, possono essere soggetti ad interessanti operazioni di fusione per consentire nuove analisi dell'oggetto.

1.2.2 IL LASER A SCANSIONE TERRESTRE

La diffusione delle tecniche laser a scansione è abbastanza recente e certamente è una delle tecnologie in più grande espansione. Un settore di notevole interesse, e che per primo si è sviluppato per lavori di notevole interesse, è quello del laser aviotrasportato, per rilievi del territorio ed in particolare per la realizzazione di modelli digitali del terreno ad alta densità; un altro segmento molto interessante, e che sarà oggetto della tesi, è quello dei sistemi per applicazioni terrestri, indicato nella letteratura anglosassone con la sigla TLS (Terrestrial Laser Scanner).

Come noto, un sistema a scansione laser fornisce come output un insieme di coordinate tridimensionali di un numero elevatissimo di punti dell'oggetto che vengono colpiti da un fascio laser. La nuvola di punti creata descrive la superficie dell'oggetto scansionato con estrema accuratezza e precisione. Il

sistema di acquisizione è sostanzialmente simile per tutti i sistemi laser: il raggio, mediante opportuni sistemi ottico-meccanici in rotazione, viene inviato verso l'oggetto variando per passi discreti gli angoli azimutale e zenitale. Per ogni punto collimato sono quindi noti due angoli (azimutale e zenitale) ed una distanza. Le tipologie di laser presenti sul mercato differiscono per la diversa tecnologia applicata nella valutazione della distanza; nei capitoli successivi le differenze saranno presentate più nello specifico. Dalle coordinate polari ottenute è allora possibile passare ad un sistema di coordinate cartesiane (X,Y,Z) con origine nel centro strumentale.



Figura 3 Esempio di sistema laser a scansione terrestre: lo strumento Faro LS 880

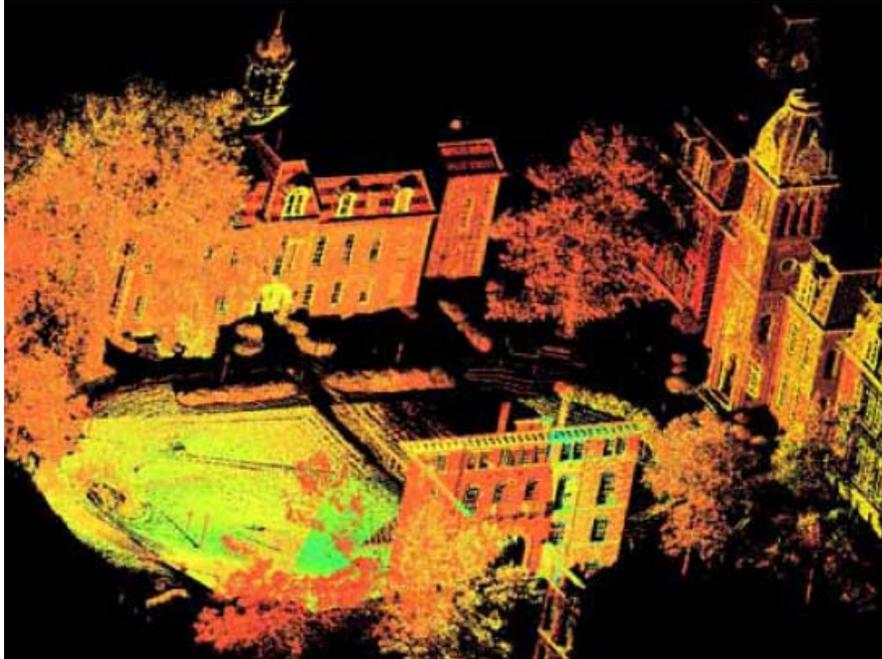


Figura 4 Woodburn circle at West Virginia University realizzato con laser a scansione

Questa immagine è il risultato di una sessione di misura effettuata tramite il laser scanning, qui si possono vedere le migliaia di migliaia di punti che descrivono la superficie degli oggetti presenti nel campus dell'Università. Ad ogni punto è poi associato anche un valore di intensità radiometrica, ricavato dalla riflettanza delle superfici al fascio laser.

Sono molti gli aspetti che andrebbero analizzati relativamente a questa tecnica, se ne possono qui citare solo alcuni.

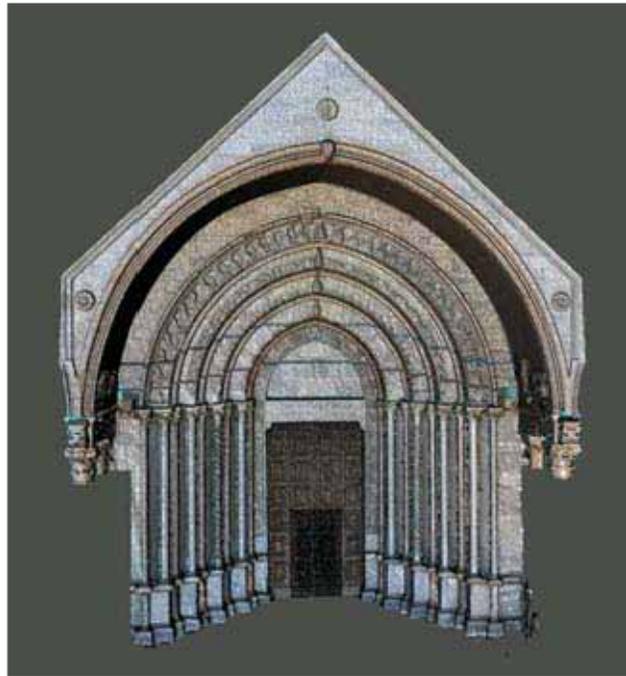
Essendo una tecnologia recente come applicazione sui beni culturali, non esiste attualmente molta letteratura sul problema della precisione ed accuratezza degli scanner. Questa mancanza di dati porta a un'incertezza nel prevedere qual è la precisione del prodotto metrico ottenuto.

Altri problemi propri del rilievo sono costituiti dalla presenza sull'oggetto di spigoli e lati, dato che il raggio laser colpisce solo in parte queste zone di confine. Nel percorso di ritorno una parte del raggio può colpire altri oggetti generando segnali spuri di ritorno e si possono quindi ottenere errori nella valutazione delle coordinate 3D.

Da sottolineare è l'importanza nel campo applicativo dei beni culturali delle tecniche di texture mapping fotografiche: esse consentono di proiettare le

immagini fotografiche sul modello metrico 3D ottenuto in output dallo scanner.

Questa metodologia prevede l'utilizzo combinato di fotogrammetria e laser scanning. La scansione fornisce i dati metrici ed il modello digitale dell'oggetto (DSM); la fotografia viene quindi proiettata sul modello. Per rendere possibile questo procedimento devono essere noti i parametri di orientamento esterno del (DSM). Così facendo la scansione ricava le informazioni radiometriche dalle diverse foto eseguite ottenendo, in uscita, un modello DSM con applicate le *textures* fotografiche. L'effetto ottenuto è notevolmente realistico e gradevole; inoltre esso consente di indagare con più precisione sullo stato di conservazione dell'oggetto. Da questo prodotto, eseguendo una proiezione ortogonale su un qualsiasi piano, è possibile ottenere l'ortofoto di precisione.



**Figura 5 Ingresso duomo di Ancona
DSM con *textures* fotografiche ottenuto dall'elaborazione dei dati ricavati da una sessione di misura
al laser scanning combinata all'uso di prese fotografiche.**

1.2.3 LA STRUMENTAZIONE TOPOGRAFICA ELETTRONICA

Le stazioni totali ed i livelli sono spesso strumenti essenziali per il rilievo di qualsiasi tipo di oggetto. Le total station sono strumenti indispensabili per ottenere le coordinate spaziali di un numero di punti selezionati dall'utilizzatore che serviranno, ad esempio, per appoggiare un rilievo fotogrammetrico o per geo-referenziare una nuvola di punti fornita dalla scansione laser. Tali strumenti possono essere inoltre sia impiegati sia per il controllo dei movimenti e deformazioni, fornendo precisioni anche sub-millimetriche, sia quando non necessitano grandi precisioni e si vogliono ottenere solamente le coordinate di alcuni spigoli fondamentali del fabbricato.

Fra gli strumenti topografici elettronici che sono di valido ausilio nel rilievo dei beni culturali non bisogna dimenticare anche i livelli, ora quasi sempre di tipo digitale.

Attualmente il mercato fornisce le seguenti categorie di strumenti topografici elettronici che, seppur evoluti, mantengono i principi ispiratori e i miglior standard di precisione dei vecchi ed originari strumenti analogici:

- ✓ **stazioni totali**: possiedono elevata capacità di memorizzazione dati e pacchetti evoluti di programmi accessori;
- ✓ **stazioni totali con distanziometro ad impulsi**: sono essenziali in tutti quei casi dove non è possibile utilizzare il prisma riflettore;
- ✓ **stazioni totali ad elevata automazione**: consentono un rilievo con un singolo operatore utilizzando ricerca automatica del segnale;
- ✓ **livelli digitali**



Figura 6 Esempio di total station: Leica TC2003

1.2.4 IL GPS

La tecnologia GPS è usata prevalentemente in campo archeologico per determinare la posizione assoluta di un sito localizzato in una qualsiasi posizione sulla terra; l'accuratezza del dato calcolato dipende, come noto, dal tipo di tecnica utilizzata e dalla configurazione.

La tecnologia GPS può essere usata anche per determinare la posizione di alcuni punti necessari per la referenziazione di un rilievo eseguito con tecniche fotogrammetriche, laser o topografiche tradizionali. In luoghi che non siano raggiunti da punti fiduciali che li localizzino in un sistema di riferimento assoluto, la tecnica GPS si rivela l'unica soluzione. Altro grande vantaggio delle applicazioni GPS è la possibilità di ottenere una rete di punti a precisione omogenea con coordinate definite in un sistema di riferimento globale.

Le applicazioni pratiche che il GPS può trovare possono essere classificate come:

- ✓ posizionamento assoluto, mediante un solo strumento, con accuratezza indicativa intorno ai 15 m ;
- ✓ DGPS con misura di codice: la determinazione delle coordinate di questi punti può arrivare a precisioni di 1-3 m;
- ✓ rilievi in modalità cinematica, se possibile con soluzione OTF, per delimitare perimetri o punti di appoggio: la precisione di questo tipo di rilievo può arrivare a qualche centimetro;
- ✓ rilievi in modalità rapido-statica per la definizione di punti di appoggio di alta qualità, da utilizzarsi ad esempio per lo stazionamento dei classici strumenti topografici: la precisione è di ordine centimetrico;
- ✓ rilievi di lunga durata in modalità statica per la determinazione delle coordinate assolute di punti mediante il collegamento a vertici noti.

L'uso del GPS nell'ambito del rilievo dei beni culturali è talvolta accoppiato all'impiego di altre strumentazioni.

I vantaggi e le possibilità di applicazione delle tecniche GPS, soprattutto combinate con altre metodologie di rilievo, sono veramente molteplici: il GPS spesso riesce a risolvere problematiche di posizionamento e referenziazione che non sono risolvibili con altre metodologie. Nonostante i molti vantaggi della metodologia GPS, esistono come sempre anche dei punti a sfavore.

La tecnologia GPS è basata su di un ellissoide di riferimento (WGS84) e quindi le quote ricavabili dalle misure GPS sono appunto le quote ellissoidiche, ovvero la distanza fra punto considerato e la superficie ellissoidica di riferimento, distanza misurata sulla normale all'ellissoide passante per il punto in questione. Tale misura non ha alcun concetto fisico, ma solamente geometrico. La quota ortometrica è invece quella che

possiede un concetto fisico, legato al campo gravitazionale: in termini pratici è quella che ci indica in quale verso scorre l'acqua, poiché i fluidi vanno sempre da una quota ortometrica maggiore ad una minore, mentre la stessa cosa non si può dire per la quota ellissoidica ricavabile dalle misure GPS. Per passare fra i suddetti due sistemi di quote è indispensabile conoscere l'ondulazione geoidica locale, ma essa non è sempre nota, soprattutto per i luoghi lontani da insediamenti antropici, dove per esempio possono trovarsi i siti archeologici. Sono stati sviluppati modelli matematici che permettono di ottenere le ondulazioni geoidiche richieste, le precisioni ottenibili non sono però elevatissime.

1.2.5 LA FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria è sicuramente la disciplina più impiegata nell'ambito del rilievo di dettaglio. Le sue caratteristiche sono di essere una tecnica che non richiede il contatto fisico con l'oggetto, di rapida acquisizione, con una elevata flessibilità d'impiego ed un'ottima precisione nella determinazione metrica della forma e della geometria degli oggetti. Queste caratteristiche hanno decretato una diffusione molto elevata, ampliata anche dalle nuove prospettive offerte dal digitale. Per le caratteristiche appena citate, la fotogrammetria sembra non arrestare il suo processo di evoluzione, tentando di sfidare anche le promettenti ed allettanti tecniche a scansione laser che potrebbero, in un prossimo futuro, metterla in crisi. I software di fotogrammetria digitale presenti sul mercato consentono, attraverso moderni ed evoluti algoritmi di calcolo, di automatizzare enormemente tutte le fasi di elaborazione dei dati fotogrammetrici acquisiti sul campo. Le fasi operative che possono usufruire maggiormente di questa automazione sono: le fasi di orientamento, interno ed esterno e la restituzione dell'oggetto con procedimenti di **image matching**. La ricerca tende a ridurre i costi dei prodotti utilizzando immagini digitali e appositi programmi che automatizzino molti passi del lavoro; la strada è ancora lunga perché i

procedimenti svolti in automatico dai software non sono ancora del tutto efficienti e non sempre garantiscono elevate precisioni.

Le equazioni governanti la fotogrammetria derivano da studi sulla geometria proiettiva; trascurando le distorsioni, le immagini utilizzate in fotogrammetria possono essere considerate prospettive centrali dell'oggetto. L'operazione di scrittura dell'immagine sulla pellicola comporta una trasformazione non lineare dalle coordinate oggetto (XYZ) alle coordinate immagine (ξ, η) governata dalle **equazioni di collinearità**.

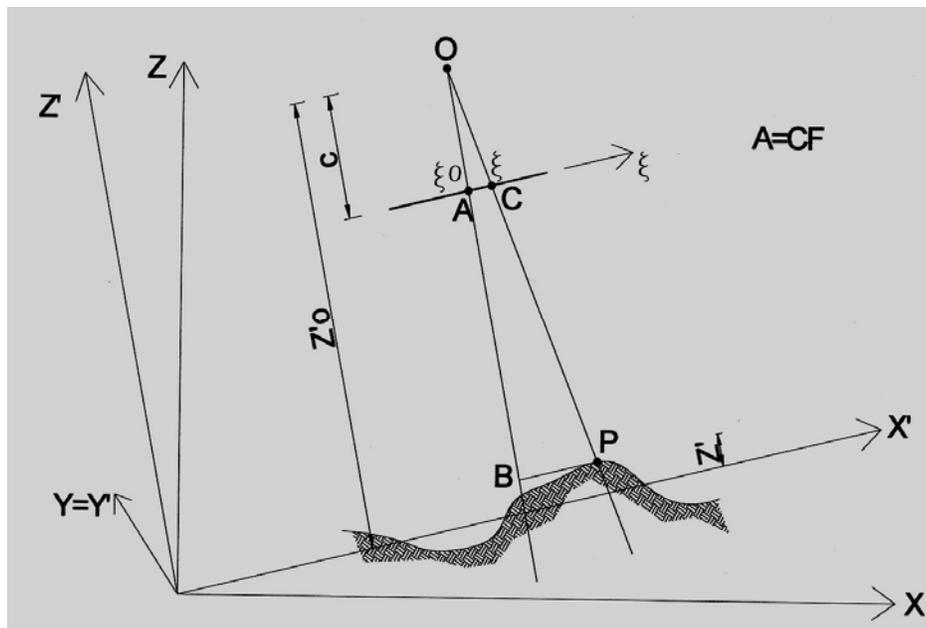


Figura 7: Schema per ricavare le equazioni di collinearità.

Considerando i due triangoli simili OAC e OBP, è possibile scrivere le seguenti relazioni:

$$(\xi - \xi_0) : c = (X' - X'_0) : (Z'_0 - Z')$$

$$(\eta - \eta_0) : c = (Y' - Y'_0) : (Z'_0 - Z')$$

Dalle quali si esplicano i seguenti termini:

$$\xi - \xi_0 = c \frac{X' - X'_0}{Z'_0 - Z'}$$

$$\eta - \eta_0 = c \frac{Y' - Y'_0}{Z'_0 - Z'}$$

Per passare dal sistema di riferimento X', Y', Z' a quello X, Y, Z si introduce una matrice di rotazione spaziale \mathbf{R} in modo tale che

$$(\underline{X} - \underline{X}_0) = \tilde{\mathbf{R}}(\underline{X}' - \underline{X}'_0)$$

E sfruttando le proprietà delle matrici di rotazione, ovvero $\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1}$ si ricavano i valori delle coordinate nel sistema cartesiano X, Y, Z :

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{R}}^{-1} = \tilde{\mathbf{R}}^T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$(\underline{X}' - \underline{X}'_0) = \tilde{\mathbf{R}}^T(\underline{X} - \underline{X}_0)$$

$$R = \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{vmatrix}$$

Svolgendo i prodotti si perviene alle seguenti espressioni:

$$(\underline{X}' - \underline{X}'_0) = r_{11}(\underline{X} - \underline{X}_0) + r_{21}(\underline{Y} - \underline{Y}_0) + r_{31}(\underline{Z} - \underline{Z}_0)$$

$$(\underline{Y}' - \underline{Y}'_0) = r_{12}(\underline{X} - \underline{X}_0) + r_{22}(\underline{Y} - \underline{Y}_0) + r_{32}(\underline{Z} - \underline{Z}_0)$$

$$(\underline{Z}' - \underline{Z}'_0) = r_{13}(\underline{X} - \underline{X}_0) + r_{23}(\underline{Y} - \underline{Y}_0) + r_{33}(\underline{Z} - \underline{Z}_0)$$

Che, sostituite nelle (1.1) ed esplicitate le X e le Y, forniscono le equazioni di collinearità:

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33} \cdot c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23} \cdot c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33} \cdot c}$$

Le **equazioni di collinearità** qui sopra riportate evidenziano come, a causa della presenza delle Z al secondo membro, per ogni punto immagine esistano infiniti punti oggetto. È quindi impossibile ricostruire la geometria spaziale di un oggetto a partire da un solo fotogramma: si rendono necessari almeno due fotogrammi o ulteriori informazioni sulle coordinate Z. Ad esempio se l'oggetto è piano possiamo scegliere un sistema di riferimento oggetto con il piano XY coincidente col piano dell'oggetto, in questo modo tutte le componenti Z dei punti del piano sono nulle e quindi è possibile restituire tutti i punti del piano a partire da un solo fotogramma.

Le trasformazioni definite dalle equazioni di collinearità richiedono la conoscenza dei parametri di orientamento, questi possono essere divisi in due categorie: i parametri di orientamento interno (P.O.I.) e i parametri di orientamento esterno (P.O.E.):

- P.O.I. : definiscono la posizione del centro di proiezione relativamente al piano dell'immagine e sono tre: ξ_0 , η_0 coordinate immagine del PP (punto principale), c distanza principale;
- P.O.E. : questi invece definiscono la posizione ed assetto della camera al momento dello scatto nel sistema di coordinate oggetto, e sono sei: X_0, Y_0, Z_0 coordinate oggetto del centro di presa e ω, ϕ, κ angoli di rotazione della camera attorno agli assi coordinati.

La definizione della prospettiva centrale, rappresentata da un fotogramma, richiede quindi in totale 9 parametri, i P.O.I. sono costanti, caratteristici della particolare camera utilizzata e determinati dal costruttore e vengono riportati nel certificato di calibrazione insieme ad altre informazioni quali le coordinate immagine delle marche fiduciali o dei reseau ed i valori della distorsione radiale. Tali P.O.I. possono essere comunque sempre ricavati con misure di laboratorio mediante una procedura di autocalibrazione della camera. I P.O.E. vengono invece determinati durante la fase di orientamento esterno delle prese, per fare ciò si utilizzano i punti di coordinate oggetto note, chiamati punti fotogrammetrici di appoggio (P.F.A.), disposti uniformemente sull'oggetto da rilevare. Con almeno 3 di questi P.F.A. si possono scrivere (tramite le equazioni di collinearità) 6 equazioni (ogni punto ne genera 2) atte a risolvere il sistema.

Risulta quindi che per orientare ogni fotogramma sono necessari un minimo di 3 punti di coordinate oggetto note, nel caso si posseggano n P.F.A. si possono scrivere $2n$ equazioni tramite la (1.2) e risolvere il sistema con il metodo dei minimi quadrati. Purtroppo le equazioni di collinearità non sono lineari e quindi per essere impiegate nella compensazione ai minimi quadrati devono essere prima linearizzate in serie di Taylor nell'intorno di una soluzione approssimata. Risolti i vari problemi di calcolo, alla fine si determinano i 6 P.O.E. voluti, a questo punto si può dare inizio alla fase di restituzione. Ora per ogni punto oggetto incognito possediamo due coordinate immagine dello stesso misurabili sul fotogramma, è quindi possibile impiegare sempre le (1.2) per scrivere 2 equazioni per ogni punto immagine, ma le incognite (coordinate oggetto del punto) sono 3 (X, Y, Z). Quindi non è in alcun modo possibile risolvere il sistema, l'unica soluzione prevede di avere qualche informazione sulla coordinata Z , oppure si utilizza un coppia di fotogrammi. In quest'ultimo caso è possibile scrivere 4 equazioni (2 per ogni punto e tante volte quante sono i fotogrammi in cui compare). Avendo a disposizione un sistema di 4 equazioni in 3 incognite

(le coordinate X,Y,Z, del punto) è possibile mediante compensazione ai minimi quadrati trovare la soluzione del problema.

In generale possedendo n fotogrammi il ragionamento è del tutto analogo a quello appena fatto, ogni fotogramma deve essere prima orientato attraverso la determinazione dei suoi 6 P.O.E. ricavabili mediante le (1.2) ed almeno 3 P.F.A., orientati tutti gli n fotogrammi è possibile passare alla fase di restituzione in cui per ogni punto collimato sul fotogramma è possibile scrivere 2 equazioni, mentre le incognite sono 3 (X,Y,Z) per ogni punto oggetto che si vuole restituire. Affinché il sistema sia risolvibile è dunque necessario che le equazioni siano in numero superiore alle incognite, in altre parole ogni punto oggetto incognito deve comparire su di almeno due fotogrammi.

La fase successiva è la fase di restituzione, dove si vogliono mettere in relazione le coordinate immagine (ξ, η) e le coordinate oggetto (XYZ). Per fare questo è necessario utilizzare due fotogrammi che generano quattro equazioni, esse devono essere risolte nelle tre incognite attraverso compensazione ai minimi quadrati.

Tra i moderni prodotti ottenibili dalla fotogrammetria digitale possiamo ricordare i modelli numerici del terreno (DTM) ed i modelli digitali degli oggetti ricavati mediante la definizione di superfici (DSM). Da tali modelli digitali dell'oggetto è poi possibile ottenere mediante proiezione ortogonale, i prodotti raster chiamati ortofoto. Queste ultime coniugano l'informazione metrica a quella più particolareggiata della fotografia.

L'integrazione delle tecniche del laser a scansione e della fotogrammetria è ideale perché è possibile coprire le carenze ed i difetti dell'uno o dell'altro metodo. Le due metodologie sono fra loro complementari e già si tende a sfruttare la scansione laser per ottenere i modelli digitali dell'oggetto che viene poi completato utilizzando i prodotti derivanti dalla fotogrammetria.

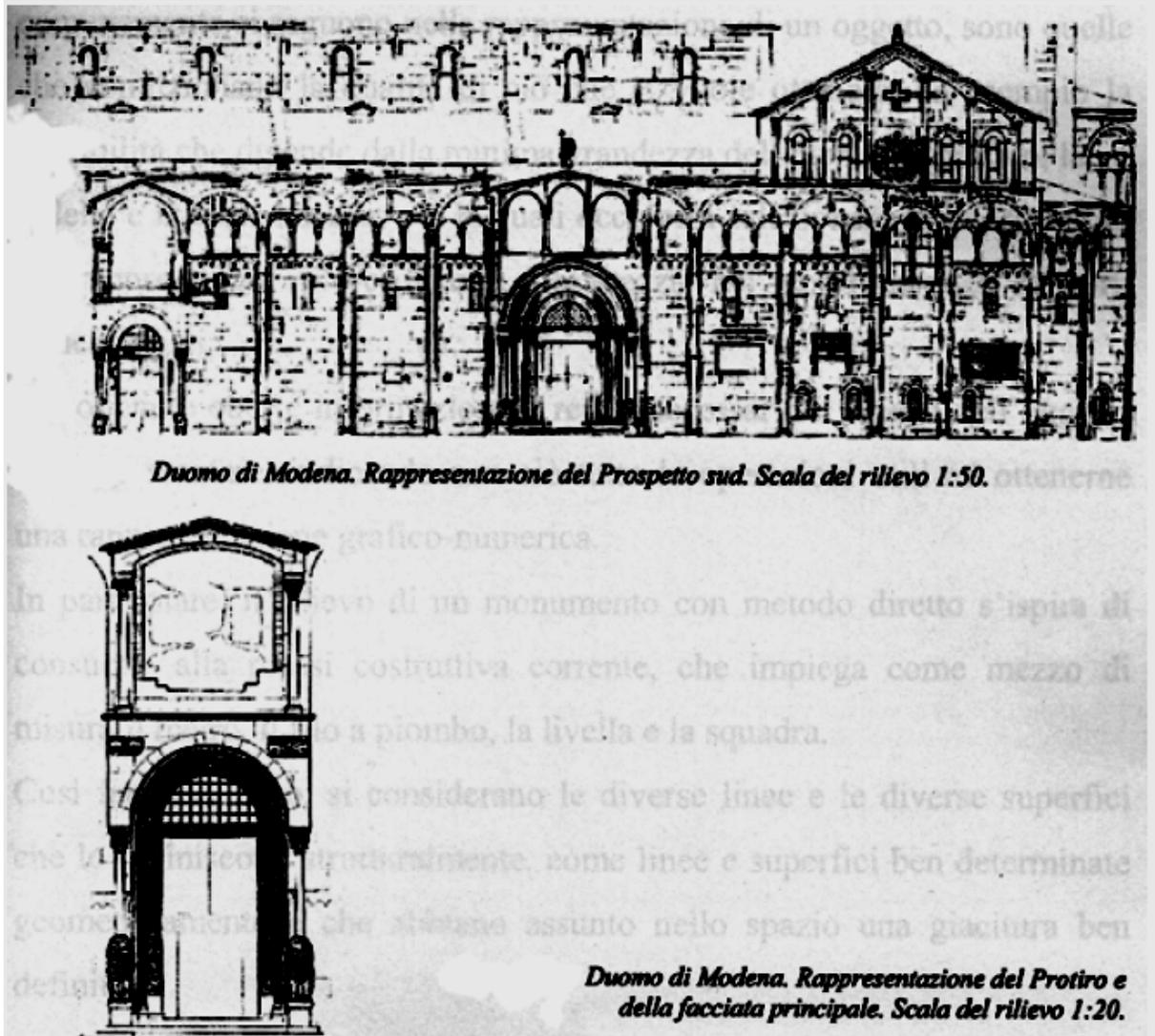


Figura 8 Duomo di Modena: restituzione vettoriale realizzata con la tecnica fotogrammetrica

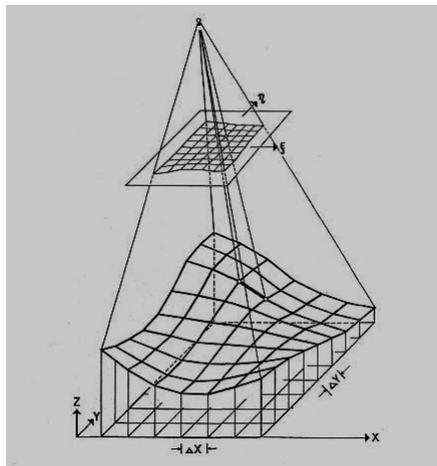
Da questa rappresentazione è possibile comprendere quanto la tecnica fotogrammetrica riesca a restituire in modo dettagliato ed esatto la reale forma di oggetti anche molto complessi e dalle geometrie più svariate.

1.2.6 L'ORTOFOTO

L'ortofoto è un eccellente prodotto raster che deriva dal raddrizzamento di immagini fotografiche. Tale operazione può essere più o meno sofisticata: dal semplice raddrizzamento generale (fotopiano) a quello differenziale (ortofoto) basato sulla conoscenza di un DSM dell'oggetto.

Tramite la restituzione fotogrammetrica si possono ottenere mappe e rilievi vettoriali di ogni tipo, che riportano l'oggetto voluto in una apposita scala che permette di effettuare in modo efficace qualunque misura sull'oggetto. L'ortofoto coniuga l'informazione metrica con quella fotografica. La realizzazione di un'ortofoto risulta alquanto semplice, economica e rapida, tanto che può essere una soluzione migliore rispetto alla classica restituzione del prospetto del fabbricato. In alcuni casi, tramite una trasformazione omografica, è possibile operare un raddrizzamento generale del piano. Nel caso, invece, di oggetti dalla forma complessa e con profondità variabili in modo non trascurabile sulla superficie, il semplice raddrizzamento generale non è di alcuna utilità. In questi casi l'oggetto viene diviso in tante parti più piccole che possono essere pensate a profondità costante; fatto ciò viene poi impiegato il raddrizzamento differenziale. In quest'ultima condizione è quindi assolutamente indispensabile disporre un DSM dell'oggetto da ortorettificare che viene solitamente creato per oggetti di una certa importanza.

Quando un oggetto presenta variazioni di quote significative, il semplice raddrizzamento generale non è sufficiente ed è quindi necessario trovare un procedimento che permetta di eliminare gli spostamenti dovuti all'altezza e all'inclinazione. Sulle piccole porzioni nelle quali è stato diviso il fotogramma si esegue un raddrizzamento, esso consiste nel cambiare di volta in volta le condizioni geometriche di proiezione.



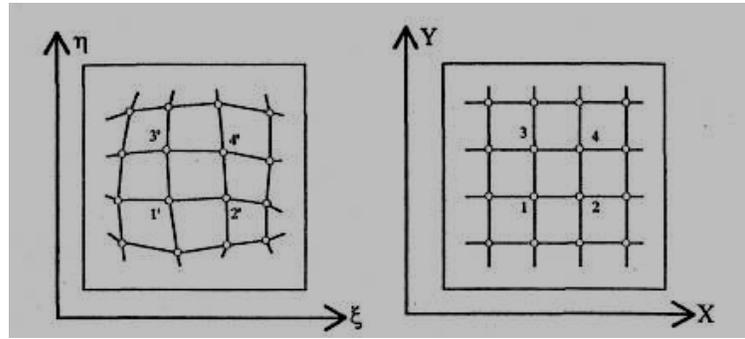


Figura 9 Relazione tra il grigliato nel piano XY e il grigliato deformato sul piano immagine

Dalla (Figura 9) è possibile comprendere la necessità di conoscere sia l'orientamento esterno del fotogramma che l'andamento della superficie dell'oggetto (DSM).

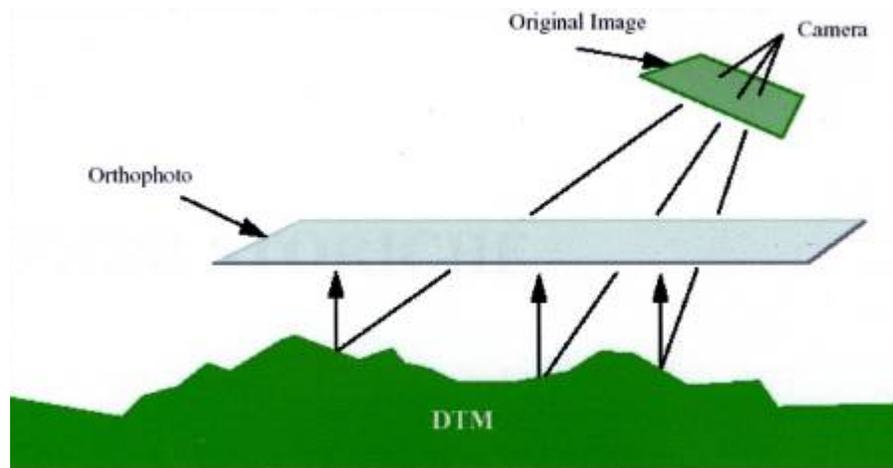


Figura 10 Realizzazione dell'ortofoto come proiezione ortogonale

L'ortofoto digitale viene prodotta attraverso la procedura di ricampionamento dell'immagine digitale originale, applicando una trasformazione inversa (Figura 12) per ogni pixel dell'ortofoto si risale al corrispondente punto sul fotogramma, utilizzando le equazioni di collinearità (il fotogramma deve essere orientato quindi devo conoscere i P.O.E.). Si può così assegnare ad ogni pixel della nuova matrice il valore di una grandezza radiometrica con uno dei seguenti metodi di interpolazione:

- ✓ **nearest neighbour**: il valore di densità (DN) del pixel di destinazione è assunto pari a quello del pixel più vicino dell'immagine di partenza;
- ✓ **interpolazione lineare**: il nuovo DN è ottenuto dalla media pesata dei 4 pixel più vicini;
- ✓ **convoluzione cubica**: come il precedente con la differenza che vengono considerati i 16 pixel più vicini.

Procedimento per la realizzazione di un'ortofoto digitale:

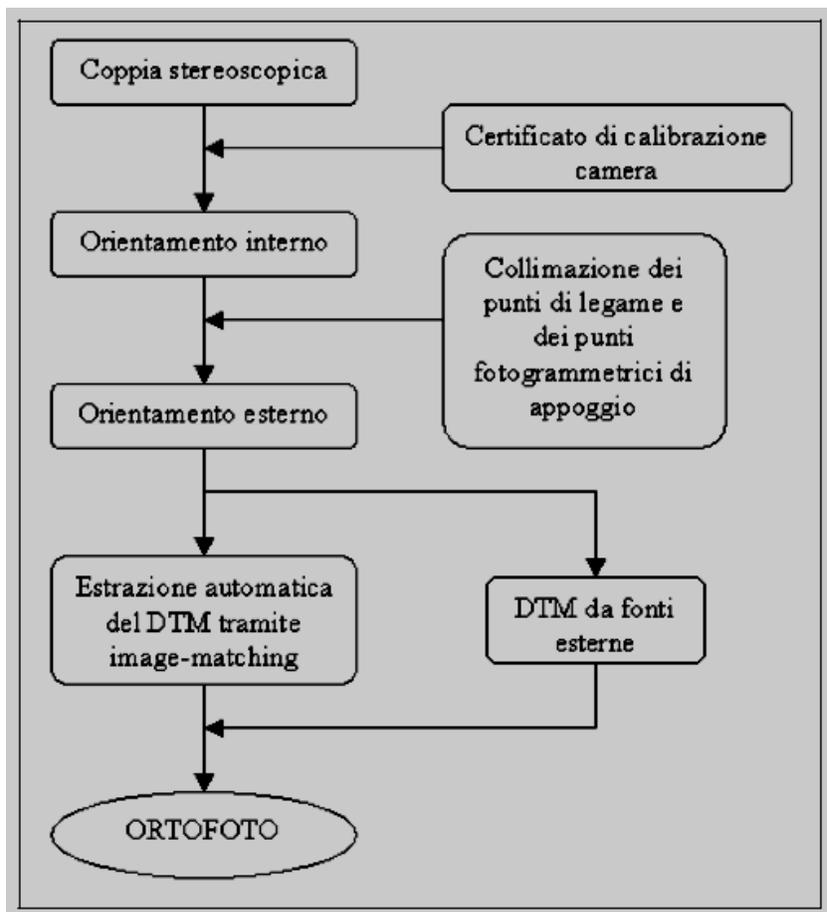


Figura 11: Procedimento per la realizzazione di un'ortofoto digitale

La procedura di generazione di un'ortofoto digitale passa attraverso le fasi seguenti:

- ✓ Definizione della matrice dell' orto-immagine, in cui ad ogni pixel corrisponde un elemento del piano sul terreno.
- ✓ Per ogni pixel dell'orto-immagine, avente univoche coordinate assolute XY, si procede così:

Si estrae un valore della quota Z dal DEM:

- ✓ Si proietta il punto terreno 3D tramite le equazioni di collinearità (devono quindi essere noti per l'immagine i parametri di orientamento interno ed esterno) ottenendo le coordinate fotogramma xy;
- ✓ Si trasformano le coordinate fotogramma xy nelle coordinate immagine ij (indice di riga e colonna nella matrice immagine) tramite una trasformazione affine (bi-dimensionale);
- ✓ Si trova sull'immagine, per interpolazione, il valore di densità corrispondente alle coordinate ij calcolate;
- ✓ Si assegna tale valore di densità al pixel sull'orto-immagine mediante uno dei metodi di ricampionamento

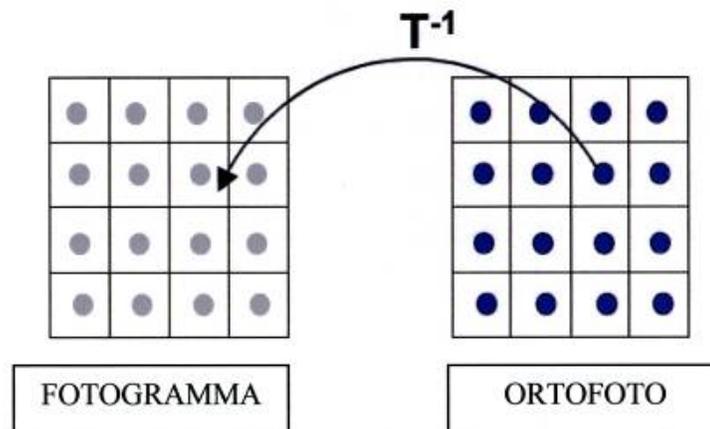


Figura 12 Trasformazione inversa, dall'ortofoto all'immagine, nel ricampionamento.

Bisogna notare che l'estrazione di un valore della quota dal DEM è basato sull'interpolazione, in quanto la risoluzione dell'orto-immagine è

solitamente maggiore di quella del DEM; questa soluzione ha però lo svantaggio che le equazioni di collinearità devono necessariamente essere risolte per ogni pixel dell'ortofoto.

Una soluzione più economica dal punto di vista computazionale, ma ovviamente meno precisa, è fornita dal cosiddetto "metodo-ancora". In tale metodo solo i punti del modello digitale del terreno sono trasformati nella matrice dell'immagine originale, e l'interpolazione di tutti gli altri punti viene eseguita successivamente nello spazio immagine.

Nel processo di generazione dell'ortofoto, i fattori concernenti l'immagine digitale di partenza che maggiormente influenzano la qualità del prodotto finale, sono la scala dell'immagine e l'intervallo di scansione, ovvero la risoluzione dell'immagine se essa è stata acquisita in maniera diretta.

La scelta di questi parametri dipende dai seguenti criteri:

a) Il teorema del campionamento dice che per trasferire sull'immagine digitale tutte le informazioni dell'immagine originale, l'intervallo di scansione deve essere di $7 \mu\text{m}$. Bisogna comunque tenere in considerazione che una riduzione della dimensione del pixel aumenta il rapporto segnale-rumore, un parametro che caratterizza la qualità del sensore. Gli scanner attuali presentano un rapporto segnale-rumore accettabile con una dimensione del pixel pari a $10 \mu\text{m}$.

b) La dimensione è un fattore decisivo nella produzione di immagini digitali.

c) Se l'ortofoto digitale finale deve essere prodotta su pellicola, può essere usato un ingrandimento dall'immagine originale all'ortofoto pari a $4\times$ (assumendo una risoluzione fotografica di 50 lp/mm nell'originale ed un intervallo di scansione pari a $7 \mu\text{m}$).

d) Se l'ortofoto digitale deve essere stampata, è usuale assumere una risoluzione di stampa di 70 linee/cm, corrispondente ad una dimensione del pixel nell'ortofoto stampata di 143 μm ; questa risoluzione permetterebbe un ingrandimento dall'originale all'ortofoto finale di 5 \times , corrispondente ad una dimensione del pixel nell'originale di 29 μm .

e) Se l'ortofoto digitale deve essere inserita come livello autonomo di informazione in un GIS, diviene un fattore di particolare interesse l'incertezza di definizione degli oggetti, che entra in gioco quando si hanno dimensioni del pixel a terra superiori a un valore che va da 25 cm a pochi metri, in base alla natura del territorio e all'accuratezza richiesta.

1:m _b	Intervallo di scansione	
	25 cm	50 cm
1:30000	8 μm	17 μm
1:15000	17 μm	33 μm
1:5000	50 μm	100 μm

Tabella 1: Scala immagine e intervallo di scansione per una dimensione del pixel a terra di 25-50 cm

La Tabella 1 mostra che, per ortofoto digitali, scale immagine fra 1:15000 e 1:30000 sono appropriate se le immagini originali sono state digitalizzate ad un intervallo di circa 20 μm . Se l'ortofoto digitale deve essere utilizzata per l'analisi di micro-strutture, come ad esempio può accadere in fotogrammetria terrestre, dovrebbe essere assunta una scala immagine significativamente più grande ed un intervallo di scansione più piccolo, in linea con quanto detto ai punti a) e b) (Bornaz et. al, 2004).

Nei capitoli seguenti si approfondirà la tecnologia del laser a scansione valutando gli strumenti presenti sul mercato e si utilizzerà in particolare

uno strumento prodotto dalla ditta Faro per l'esecuzione di un rilievo di tipo architettonico.

CAPITOLO II

I sistemi Laser a scansione

La parola LASER è l'acronimo per "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", cioè amplificazione della luce mediante il fenomeno dell'emissione stimolata di radiazione. Dal punto di vista applicativo il laser è una strumentazione che consente di trasformare la natura dell'energia, così da passare da una forma di energia primaria (elettrica chimica o nucleare) ad un fascio monocromatico coerente di radiazioni elettromagnetiche di elevata intensità.

L'intuizione che ha permesso l'emissione del raggio laser è stata formulata da A. Einstein nel 1917. L'ipotesi da lui sostenuta era che l'emissione di un raggio di luce ad alta intensità energetica da un atomo potesse essere stimolata da un raggio di luce incidente a una certa frequenza.

L'invenzione del laser è legata a una battaglia legale durata oltre 20 anni fra il fisico americano Charles Townes e il suo studente Gordon Gould.

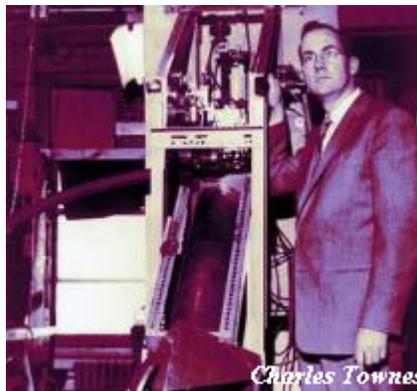


Figura 1 Charles Townes

Dopo aver fallito nella realizzazione di un radar a microonde durante la seconda guerra mondiale, Townes voleva utilizzare le microonde per

studiare la struttura delle molecole. Per questo aveva bisogno di onde elettromagnetiche con una lunghezza d'onda il più corta possibile. Non solo: per avere delle informazioni precise, la radiazione utilizzata per osservarle doveva essere, monocromatica e facilmente controllabile.

Non sapendo come ottenere una simile radiazione, Townes e il suo studente Gordon Gould si ricordarono dei lavori di Albert Einstein del 1917 su un effetto chiamato "emissione stimolata di radiazione", per cui è possibile indurre un atomo a emettere radiazione "illuminandolo" con una radiazione dello stesso tipo. Dal punto di vista di Townes e Gould, questo significava utilizzare delle molecole come sorgente di radiazione. Vi erano diversi problemi tecnici da superare, ma nel 1953, utilizzando un gas di ammoniaca, i due riuscirono a far funzionare un dispositivo che battezzarono Maser. Nel frattempo, dall'altra parte della Cortina di Ferro, il fisico sovietico Nicolay Basov e il fisico australiano, poi emigrato in Unione Sovietica, Aleksandr Prokhorov stavano ottenendo risultati simili.

A quell'epoca nessuno aveva ancora previsto che il laser avrebbe trovato applicazioni in settori anche molto, molto lontani dalla spettroscopia molecolare: infatti fu di nuovo l'esigenza di studiare la struttura delle molecole a spingere Townes e un suo collega della Columbia University, Arthur Schawlow, a cercare di ottenere lo stesso effetto con radiazione di lunghezza d'onda ancora inferiore, come la luce infrarossa o visibile. Grazie all'idea di Schawlow di sistemare degli specchi agli estremi della cavità, nel 1958 i due scienziati americani pubblicarono uno storico articolo sulla rivista *Physical Review Letters* e, nello stesso momento, brevettarono la loro invenzione.

Lo studente Gordon Gould fu il primo a utilizzare la parola Laser e a depositare presso un notaio uno schema che illustrava il nuovo dispositivo. Naturalmente sia Townes che Gould sostenevano la propria paternità dell'idea del laser, accusandosi vicendevolmente di plagio. Iniziò così una battaglia legale lunga e controversa che si risolse nel 1977 con la vittoria di

Gould. Dal punto di vista legale, l'inventore del laser fu quindi Gordon Gould, ma la comunità scientifica tende ad attribuirne l'elaborazione teorica a Townes, Basov e Prokhorov, ai quali nel 1967 venne assegnato il Premio Nobel per la fisica. Per complicare le cose, va detto che il primo dispositivo utilizzabile in pratica fu sviluppato da Theodore Maiman, che nel 1960 brevettò il laser a rubino: fu questa invenzione ad aprire definitivamente le porte alle innumerevoli applicazioni del laser. Per comprendere il funzionamento di un laser è necessario quindi studiare l'interazione tra radiazione e materia, da cui l'effetto di amplificazione trae origine.

2.1 LA LUCE E LE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

La luce visibile, così come la conosciamo, è soltanto una ridotta parte dello spettro della radiazione elettromagnetica. Un'onda elettromagnetica è un sistema di campi elettrici e magnetici oscillanti in piani ortogonali tra loro ed ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda stessa.

L'onda elettromagnetica è caratterizzata da una frequenza ν di oscillazione dei suddetti campi, cui è associata una lunghezza d'onda $\lambda = \frac{v}{\nu}$ dove $V = \frac{c}{n}$ è la velocità di propagazione dell'onda, pari nel vuoto ($n=1$) alla velocità della luce.

La luce visibile è quella parte dello spettro elettromagnetico per cui la lunghezza d'onda λ è compresa tra 400 e 750 nm.

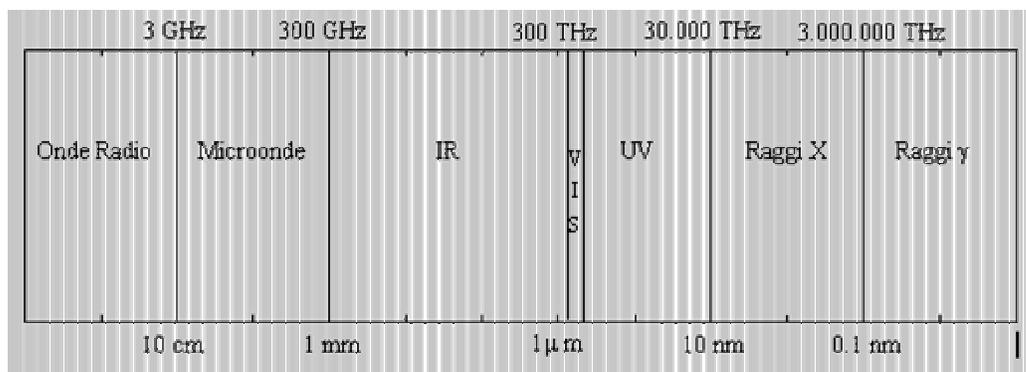


Figura 2 Spettro elettromagnetico

2.1.1 ASSORBIMENTO ED EMISSIONE

Consideriamo ora lo scambio di energia tra la radiazione elettromagnetica e gli atomi: il processo può essere visto come scambio di energia tra oscillatori microscopici oscillanti alla stessa frequenza. Se un "fotone", vale a dire un quanto di campo elettromagnetico, interagisce con un sistema atomico ove $E_2 - E_1 = h\nu$, possono avere luogo due diversi processi:

- ✓ il fotone cede la propria energia all'atomo che si trova nello stato ad energia E_1 , eccitandolo nello stato ad energia maggiore E_2 (assorbimento)
- ✓ il fotone stimola la diseccitazione dell'atomo dallo stato ad energia E_2 a quello ad energia E_1 ; in questo processo viene generato un secondo fotone identico al primo (emissione stimolata).

Il prevalere di un processo sull'altro dipende dalla popolazione relativa dei due stati: il numero Z_a di assorbimenti per unità di tempo (numero di fotoni assorbiti) sarà proporzionale al numero N_1 di atomi che occupano lo stato ad energia minore E_1 .

2.2 IL LASER E I SUOI COMPONENTI

Per le sorgenti di luce incoerente la radiazione emessa è l'insieme di un gran numero di onde indipendenti ed il fronte d'onda che ne risulta varia da punto a punto e da istante a istante. Se si desidera avere a disposizione una sorgente monocromatica entro un piccolo intervallo in frequenza, le sorgenti incoerenti forniscono un rendimento assai basso. Per chiarire questo punto è possibile fare un esempio: la superficie solare è assimilabile ad un corpo nero a temperatura $T = 6000$ K. Da un cm^2 di questa superficie vengono emessi circa 7000 joule/s. Dalla formula di Planck si può ricavare che se si potesse filtrare una piccola parte di questa radiazione, ottenendo una banda larga un MHz intorno al picco della radiazione solare (480 nm,

luce verde), l'energia proveniente da 1 cm^2 di superficie solare sarebbe soltanto 10^{-5} joule/s . Questa enorme perdita di efficienza non si verifica in sistemi, come il laser, in cui si fa uso del meccanismo di emissione stimolata, in quanto i fotoni prodotti tramite questo meccanismo, essendo generati in condizioni di "risonanza" tra campo elettromagnetico e distanza in energia tra i livelli atomici, saranno automaticamente monocromatici.

2.2.1 CAVITA' RISONANTE

Un componente importante di un laser è il cosiddetto "risonatore ottico" o "cavità risonante". Questo è in genere composto da una coppia di specchi contrapposti, nel cui interno viene posto il cosiddetto "mezzo attivo", cioè il materiale (gas, liquido o solido) i cui atomi sono utilizzati per il processo di emissione stimolata. In tale modo la radiazione generata viene riflessa avanti ed indietro tra i due specchi e ad ogni passaggio attraverso il mezzo attivo viene amplificata. In generale uno dei due specchi è completamente riflettente ($R = 100\%$), mentre l'altro, detto specchio di uscita, è solo parzialmente riflettente (con valori per la riflettività R che vanno in genere dall'80% al 99%). Questo permette di "estrarre" una parte della radiazione che si accumula nella cavità risonante. La cavità risonante produce inoltre un effetto di "selezione" sulla lunghezza d'onda di emissione del laser; infatti all' interno di una cavità risonante di questo tipo possono oscillare solamente le lunghezze d'onda tali che la lunghezza della cavità sia pari ad un numero intero di mezze lunghezze d'onda.

2.2.2 POMPAGGIO

Un altro componente importante di un laser è il sistema di pompaggio: è questo la fonte di energia necessaria per eccitare gli atomi del mezzo attivo in modo da permettere di ottenere emissione coerente nel processo di diseccitazione. La condizione di oscillazione deve infatti essere mantenuta costante nel tempo per permettere l'emissione laser. Il metodo più

immediato è il cosiddetto "pompaggio" ottico, che è un sistema di pompaggio molto selettivo (eccita solo la transizione desiderata). Esistono tuttavia altri metodi di pompaggio: nel caso di un gas gli atomi mediante collisioni con elettroni liberi nel gas stesso, tramite urti anelastici con atomi o molecole. Un altro metodo, assai poco selettivo, è il pompaggio termico.

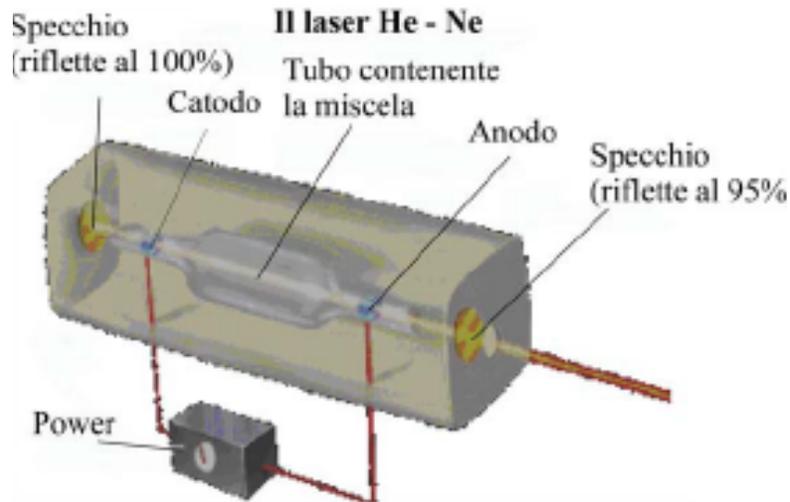


Figura 3 Esempio di creazione del raggio laser

2.3 TIPOLOGIE LASER

Il laser, come già spiegato in precedenza, è una radiazione elettromagnetica cioè un'onda luminosa, che può essere ultravioletta, visibile o infrarossa; le sue principali caratteristiche sono:

- ✓ **Monocromatica:** è composta da una sola frequenza di radiazione elettromagnetica.
- ✓ **Coerente e unidirezionale:** si propaga a grande distanza con estrema direzionalità.
- ✓ **Coerenza temporale:** costituita di onde alla stessa frequenza e in fase che si sommano tra di esse.

In funzione del materiale utilizzato come supporto i laser possono essere suddivisi in 3 categorie: gas laser, solid-state laser e semiconductor laser.

Per quanto concerne i gas laser, questi sono un gruppo piuttosto ampio, tipicamente eccitati mediante scarica elettrica, il campo di emissione è vasto (dai 300 agli 11000 nm) e possono emettere sia in continuo che in modo intermittente.

In un solid-state laser gli atomi che emettono la luce sono dispersi in un materiale cristallino o vetroso che contiene molti altri elementi, infatti il materiale capace di emettere luce risulta circa l'1% sul totale. Questi laser hanno di solito l'aspetto di una barra di piccolo diametro, tale conformazione consente di generare un raggio brillante e contemporaneamente dissipare il calore prodotto.

I semiconductor laser emettono luce quando la corrente attraversa la congiunzione tra due materiali semiconduttori. Questa famiglia è l'obiettivo di molte ricerche nello sviluppo di nuovi lasers. A differenza delle categorie precedenti emettono soprattutto in modo pulsante per consentire la dissipazione del calore.

Un ulteriore metodo di classificazione riguarda la sicurezza dei laser, infatti il raggio laser può causare danni permanenti alla vista. Per questo motivo tutti i laser vengono raggruppati in sei categorie in funzione del loro grado di pericolosità e pertanto delle precauzioni che devono essere assunte durante il loro utilizzo. Il rischio associato al laser è collegato all'energia che questo trasporta, dipendente dalla lunghezza d'onda, dall'energia trasportata da ogni impulso, dalla durata e dalla frequenza di quest'ultimo.

2.3.1 CLASSIFICAZIONE IN BASE AL MATERIALE UTILIZZATO:

✓ **Laser a stato solido**

I materiali più comuni impiegati nei laser a stato solido sono barrette di cristallo di rubino o di vetro drogati con neodimio. Le estremità delle barrette sono costituite da due superfici parallele ricoperte con

uno strato sottile di materiale non metallico, altamente riflettente. I laser a stato solido offrono la più alta potenza d'uscita e solitamente generano sequenze di impulsi luminosi molto intensi e di brevissima durata. Il pompaggio si ottiene mediante luce proveniente da tubi flash a xeno, lampade ad arco o lampade a vapori di metallo. La gamma di frequenze dei laser a stato solido oggi è stata estesa dal caratteristico infrarosso (IR) all'ultravioletto (UV), utilizzando cristalli di diidrofosfato di potassio che funzionano da “moltiplicatori” della frequenza luminosa; se i fotoni vengono fatti interagire con un bersaglio di cristalli di ittrio posto all'interno della cavità risonante, la frequenza della luce laser in uscita può essere aumentata fino a quella caratteristica dei raggi X.

✓ **Laser a Rubino**

Il laser a rubino è importante soprattutto dal punto di vista storico, essendo stato il primo laser a funzionare nel 1960 (Maiman). Il rubino è un cristallo di allumina. L'alluminio e l'ossigeno sono otticamente inerti, mentre gli ioni Cr^{3+} sono i centri otticamente attivi. Si tratta di un laser a 3 livelli: quando si irraggia il cristallo di rubino con luce bianca, questa viene assorbita dagli ioni cromo e molti elettroni vengono eccitati in un'ampia banda di livelli energetici. Quando l'atomo si diseccita emette luce rossa. Questo fenomeno, che tra l'altro è responsabile della brillantezza del rubino, viene sfruttato per ottenere l'emissione laser del rubino su due righe a 692 e 694.3 nm. È interessante notare come il rubino, cresciuto sotto forma di cristallo cilindrico, viene usato sia come mezzo attivo che come risonatore.

✓ **Laser a centri di colore**

E' una classe di laser che utilizzano come centri attivi i cosiddetti centri di colore in cristalli di alogenuri alcalini (KCl, NaCl, LiF...). I centri di colore emettono in genere nel vicino infrarosso e vengono pompati nel visibile. Si ottengono potenze medie dell'ordine del mW ed il laser può essere usato per misure spettroscopiche, a causa dell'elevata purezza spettrale e dell'accordabilità in frequenza della radiazione di uscita.

✓ **Laser a gas**

Il materiale usato in questi laser può essere costituito da un gas puro, una miscela di gas o da vapori metallici e solitamente è contenuto in un tubo cilindrico di vetro o di quarzo. Due specchi sono posti alle estremità del tubo per formare la cavità risonante. I laser a gas vengono pompati mediante luce ultravioletta, fasci di elettroni, corrente elettrica o reazioni chimiche. Il laser a elio-neon è noto per l'alta stabilità di frequenza, la purezza del colore e l'alto grado di collimazione del fascio prodotto. I laser a diossido di carbonio sono i più efficienti e potenti laser a onda continua.

✓ **Laser ad elio-neon**

E' il laser a gas più comune, più economico e più utilizzato. Il mezzo attivo è il neon, mentre la presenza dell'elio facilita il pompaggio, ottenuto tramite scarica elettrica. E' stato il primo laser a funzionare in continua. La miscela viene tenuta alla pressione di 1 torr e la pressione parziale dell'elio è di circa 5-10 volte superiore rispetto a quella del neon.

✓ **Laser ad anidride carbonica**

E' il laser più importante per quanto riguarda le applicazioni industriali, in quanto permette di ottenere un fascio in continua di elevata potenza (fino a 1 MW). Il mezzo attivo è composto da una miscela di CO₂, N₂ ed He. Le molecole di N₂ hanno lo stesso ruolo che aveva l'elio nel laser He-Ne: sono le molecole di N₂ eccitate che trasferiscono energia per collisione alle molecole di CO₂.

✓ **Laser ad Argon**

Utilizza argon ionizzato (A⁺) come mezzo attivo. Come pompaggio si utilizza una scarica elettrica con elevate correnti. Emette su una serie di righe che vanno dal verde al blu-violetto.

✓ **Laser a Eccimeri**

Il termine eccimero indica "dimero eccitato", cioè una molecola, composta da due specie chimiche, che esiste solo nello stato eccitato mentre nello stato fondamentale non risulta legata chimicamente. Gli eccimeri più utilizzati sono gli alogenuri di gas nobili, dove atomi di argon, kripton, xenon, si combinano, nello stato eccitato, con alogeni quali cloro, fluoro etc. Emettono tutti nell'ultravioletto e risultano essere la sorgente laser più efficiente in questa regione spettrale. Il pompaggio viene eseguito con una scarica elettrica, ottenuta con raggi X o utilizzando un fascio di elettroni.

✓ **Laser a liquido**

Nei laser a liquido il materiale attivo è costituito generalmente da un colorante inorganico, chiuso in un recipiente in vetro. Sono pompati con potenti lampade flash per operare nella modalità a impulsi oppure con un laser a gas ausiliario per operare nella modalità a onda continua. La frequenza caratteristica di questi laser può essere regolata utilizzando un prisma posto all'interno della cavità.

✓ **Laser a colorante**

Tutta una classe di laser, detti a colorante, o dye lasers, usano coloranti (in alcool o acqua). La banda di fluorescenza risulta molto larga e quindi esiste la possibilità di accordare la frequenza del laser con facilità. In generale sono pompati otticamente, con lampade a flash molto rapide o con altri laser (N_2 o Argon per la rodamina 64, che può anche lavorare in continua).

✓ **Laser a semiconduttore**

Di dimensioni particolarmente compatte, i laser a semiconduttore sono basati su una giunzione tra semiconduttori dotati di diversa conducibilità elettrica. La cavità risonante è confinata alla zona di giunzione per mezzo di due pareti riflettenti. Il semiconduttore più usato e più efficiente è l'arseniuro di gallio. Questi laser sono pompati mediante l'applicazione diretta di corrente elettrica alla giunzione e possono operare in modalità a onda continua con un rendimento superiore al 50%. I laser a semiconduttore vengono comunemente impiegati nei lettori di compact disc (CD) e nelle stampanti laser. I più recenti sviluppi in questo settore sembrano promettere la realizzazione a breve di laser di dimensioni talmente piccole da poter essere inclusi in un chip di silicio. Costituiti da nanofili di solfuro di cadmio, i nanolaser potrebbero consentire un ulteriore sviluppo della microcomponentistica elettronica. Contrariamente ai laser convenzionali, in cui vengono coinvolti gli stati atomi o molecole, in un semiconduttore non si può considerare un atomo isolato, ma bisogna considerare tutto il cristallo nel suo insieme, con una certa distribuzione degli elettroni, che si dispongono in "bande" di energia.

✓ **Laser a elettroni liberi (FEL)**

Questi laser producono la luce utilizzando gli elettroni liberi di un plasma, i quali si muovono a spirale (e quindi emettono radiazione perché accelerati) seguendo le linee di un campo magnetico. Furono sviluppati nel 1977 e oggi sono largamente utilizzati nella ricerca. La loro frequenza è regolabile come per i laser a colorante, ma può coprire l'intera porzione dello spettro che va dai raggi infrarossi ai raggi X. Si ritiene che in poco tempo saranno in grado di generare radiazioni ad alta potenza a costi ragionevoli, mentre per ora la loro applicazione resta limitata proprio per motivi economici. Nel Laser ad elettroni liberi non si usa un sistema di atomi o molecole come mezzo attivo, bensì un fascio di elettroni relativistici. Questi vengono costretti su una traiettoria oscillante da un campo magnetico statico variabile nello spazio (generato da un oggetto detto *ondulatore magnetico*), per cui, come tutte le cariche accelerate, perdono energia emettendo radiazione. Volendo trovare analogie con i sistemi laser convenzionali, si può osservare che il campo magnetico prodotto dall'ondulatore gioca il ruolo del mezzo attivo, mentre il fascio di elettroni è l'equivalente del sistema di pompaggio dei sistemi laser tradizionali (Remondino, 2006).

2.3.2 CLASSIFICAZIONE IN BASE AI LIVELLI DI RADIAZIONE EMERGENTE

La classificazione si prefigge l'obiettivo di tutelare le persone a contatto con il fascio luminoso indicando i rischi che si possono correre. L'occhio è l'organo più vulnerabile per natura e conformazione, a seconda della lunghezza d'onda del raggio possono causarsi diversi tipi di lesioni: danni retinici di natura fotochimica, alterazioni retiniche, discromie, fotocheratoconguntivite e ustioni corneali.

Altre possibili danni di minore importanza possono presentarsi a carico della cute come eritemi e ustioni cutanee. I laser a potenza molto elevata possono danneggiare in modo significativo gli organi interni.

✓ *Classe 1*

vengono raggruppati in questa classe i laser intrinsecamente sicuri oppure quei sistemi non pericolosi in base alla loro costruzione con involucri fissi e dispositivi di sicurezza che blocchino l'emissione in caso di guasto o di apertura accidentale dello strumento.

✓ *Classe 2*

Sono quelle strumentazioni che emettono radiazione nell'intervallo (400-700 nm) del visibile cioè a bassa potenza. Non sono intrinsecamente sicuri ma l'unica possibilità di danno si ha in caso di diretto contatto occhio raggio.

✓ *Classe 3A*

Sono laser con potenze di uscita non inferiori a 5 mW, in cui un contatto anche indiretto di occhi (dispositivi ottici) e raggio può causare danni.

✓ *Classe 3B*

I livelli di emissione non devono superare i 500 mW e lo spettro di emissione è nel visibile, infrarosso e ultravioletto. L'esposizione diretta è sempre pericolosa mentre quella ottenute per riflessione non è a rischio.

✓ *Classe 4*

Sono i dispositivi più potenti e pericolosi ed il loro utilizzo richiede estrema prudenza anche alla radiazione riflessa e diffusa. (Bornaz, 2004)

2.4 APPLICAZIONI LASER

Le applicazioni dei laser sono molteplici ed assai importanti. Si può con certezza affermare che nel campo dell'ottica e della spettroscopia il laser ha avuto un ruolo pari a quello dei transistor nell'elettronica. I settori che utilizzano la tecnologia laser sono numerosissimi: industria, ricerca scientifica, comunicazioni, e si trovano anche importanti applicazioni in medicina, in campo militare e, tema legato alla presente tesi, nel rilievo a distanza della geometria di oggetti con tecniche a scansione. In merito a quest'ultimo tema, che si approfondirà più oltre, si può dire che un laser a scansione fornisce le coordinate di milioni di punti in un sistema di riferimento correlato con lo strumento. La nuvola di punti che descrive l'oggetto rilevato è caratterizzata da valori di precisione che, per la strumentazione terrestre, vanno indicativamente dai 5 mm ai sub-millimetrici e da una elevata velocità di raccoglimento dei dati, nell'ordine di centinaia o migliaia di punti al secondo (questi valori dipendono dallo strumento utilizzato).

Applicazioni scientifiche

Grazie alla direzionalità e monocromaticità della luce laser, oggi si possono facilmente rilevare variazioni di luce o slittamenti di frequenza estremamente piccoli. Ciò ha permesso di studiare con successo le strutture molecolari. Con i laser è stato possibile misurare la velocità della luce con un'accuratezza mai raggiunta in precedenza, attivare reazioni chimiche in modo selettivo e individuare in campioni ridotti la presenza di sostanze di traccia.

Ottica non lineare : la radiazione laser di elevata potenza può dar luogo a modifiche del comportamento di alcuni materiali e generare fenomeni non lineari. Un esempio tipico è quello della generazione di armonica in cristalli non lineari, ove è possibile ottenere frequenze multiple della frequenza

incidente sul cristallo, permettendo così di "creare" sorgenti altrimenti non ottenibili.

Spettroscopia : i laser risultano assai utili per lo studio delle proprietà di assorbimento dei materiali, in quanto sono accordabili in frequenza e la radiazione emessa esibisce larghezze di banda assai piccole. Risultano poi insostituibili quando è necessario effettuare spettroscopia in emissione, in quanto permettono di raggiungere elevate potenze di pompaggio in zone spettrali molto ben definite, al contrario delle lampade convenzionali.

Generazione di impulsi ultracorti : la possibilità di ottenere da un laser impulsi ultracorti risulta assai utile quando si deve seguire la dinamica di fenomeni estremamente veloci, per esempio la fotosintesi.

Applicazioni industriali

Potenti fasci laser possono essere concentrati in zone piccolissime e quindi possono essere usati per riscaldare, fondere o vaporizzare una sostanza con grande precisione. Sono utilizzati, ad esempio, per forare diamanti, rettificare parti di macchine, tagliare componenti elettronici di microcircuiti, trattare con il calore i chip semiconduttori, sintetizzare nuovi materiali e condurre esperimenti sulla fusione nucleare. I potenti e brevissimi impulsi prodotti da un laser rendono anche possibile la fotografia ad alta velocità, con tempi di esposizione dell'ordine del trilionesimo (un millesimo di milionesimo) di secondo. L'alta direzionalità del raggio laser è sfruttata per controllare la perfetta linearità di una strada o di un edificio. Si ricorre al laser anche per alcune applicazioni di carattere geo-topo-cartografico per il controllo degli spostamenti della crosta terrestre, per i rilevamenti geodetici e nel controllo di alcuni tipi di inquinamento dell'aria. Si sono utilizzati laser anche per misurare con esattezza la distanza della Luna dalla Terra e per eseguire esperimenti sulla relatività. Sono in via di sviluppo commutatori ad alta velocità attivati da laser, per essere utilizzati negli acceleratori di particelle.

Trasmissioni: la luce laser può percorrere grandi distanze spaziali senza sostanziali perdite di potenza. L'alta frequenza di questa luce permette di supportare un numero di canali televisivi mille volte più grande di quello attualmente permesso dalle microonde, rendendo il laser un mezzo ideale per le comunicazioni nello spazio. Fibre ottiche a bassa perdita di segnale sono state sviluppate per la trasmissione di luce laser nelle comunicazioni telefoniche e tra sistemi di computer. Una linea telefonica su fibra ottica, ove la modulante è a frequenze dell'ordine del kHz e la portante è costituita dalla luce di un laser nel visibile, che ha frequenze dell'ordine di 10^{12} Hz, permette di gestire contemporaneamente 10^9 connessioni.

Radar Laser : noto anche come Range Finder, funziona analogamente ad un radar a microonde, rivelando oggetti distanti e registrando informazioni su di essi. I vantaggi di un tale metodo sono legati all'elevata frequenza della portante, alla direzionalità della radiazione, all'operazione con impulsi ultracorti.

Misura di distanze con metodi interferometrici : nella moderna ingegneria, soprattutto meccanica, è necessario lavorare pezzi di grosse dimensioni con precisioni elevate. Tecniche particolari permettono inoltre registrazioni ad alta densità di informazione. Ad esempio, la luce laser semplifica la registrazione degli ologrammi, il metodo attraverso il quale è possibile la ricostruzione tridimensionale di un'immagine

Applicazioni medicali

Con sottili raggi laser di alta intensità e precisione direzionale si possono tagliare e cauterizzare, in frazioni di secondo , alcuni tessuti patologici, senza danneggiare quelli sani circostanti. È inoltre possibile “rincollare” al fondo dell'occhio una retina distaccata, forare le ossa, cauterizzare vasi sanguigni. Sono state sviluppate anche tecniche laser per analisi di laboratorio su campioni biologici di piccole dimensioni. Inoltre il laser ad argon penetra nella pelle e può essere usato per coagulare il sangue negli

strati più interni. Per contro il laser a CO₂ viene assorbito dalla pelle ed in generale da tutti i tessuti che contengono acqua; viene quindi usato come bisturi, con il vantaggio che mentre taglia produce la cauterizzazione dei tessuti, evitando la perdita di sangue. Notiamo che questo laser emette nell'infrarosso, per cui, per poterlo orientare, si usa un laser nel visibile di bassa potenza che viaggia nella stessa guida di luce. Proprio la possibilità di far viaggiare la radiazione del laser in fibra ottica rappresenta un altro vantaggio: è possibile utilizzare un laser anche "all'interno" del paziente, semplicemente operando con una sonda, una fibra ottica collegata al laser ed una collegata ad una telecamera.

Restauro

Una delle più nuove applicazioni della tecnologia del laser è quella del restauro di opere d'arte e dipinti antichi. Recenti studi sugli effetti chimici a lungo termine della luce ultravioletta su smalti e vernici hanno infatti escluso che questa possa arrecare danni da surriscaldamento ai materiali, autorizzando l'uso del laser su reperti preziosi. La tecnologia potrà essere utilizzata per lavori di estrema delicatezza: un computer potrà indirizzare il fascio laser con una precisione assai maggiore di quella di uno scalpello manuale, sondando la superficie dei dipinti per rimuovere lo sporco e l'eventuale vernice protettiva senza rischio di provocare danni. (www.fis.uniroma3.it; Visintini et al., 2006).

2.5 LA TECNICA DEL LASER A SCANSIONE

Nel campo del telerilevamento urbanistico-architettonico, lo sviluppo dei sistemi laser, iniziato da una decina di anni, ha raggiunto la piena maturità sia dal punto di vista tecnologico che operativo.

I sistemi laser a scansione vengono sia utilizzati per applicazioni aeree che terrestri. La scansione laser aerea è la metodologia più avanzata nel campo del rilevamento territoriale; punti di forza di questa tipologia di rilievo sono

un'altissima frequenza di campionamento, una precisione decimetrica ed una notevolissima densità di campionamento (si può arrivare sino a 10-20 punti al m^2).

La scansione laser terrestre si effettua invece posizionando lo strumento su un treppiede in posizione fissa, metodologia analoga a quella utilizzata per le stazioni totali. La scansione dello spazio circostante è ottenuta come rotazione su due assi tra loro ortogonali, si calcola la distanza dal centro strumentale (le tecnologie utilizzate per tale valutazione caratterizzano e differenziano gli strumenti) per ottenere la posizione dei punti rilevati in un sistema di coordinate XYZ rispetto al centro strumentale.

E' opportuno premettere alcune nozioni riepilogative sulle grandezze in gioco nella misura delle radiazioni elettromagnetiche.

2.6 GRANDEZZA RADIOMETRICHE

Le misurazioni che valutano la quantità di energia (Q) contenuta nella radiazione elettro-magnetica dipendono da:

- ✓ Tempo di integrazione del sensore per registrare la radiazione
- ✓ Area della superficie che viene campionata
- ✓ Intervallo spettrale di funzionamento del sensore

L'unità di misura che esprime l'energia trasportata da una radiazione è espressa in [Joule]; le grandezze radiometriche di interesse sono:

Potenza (Flusso radiante)

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Il flusso di Q, è la quantità di energia radiativa trasferita da un punto all'altro nell'unità di tempo; essa equivale ad una potenza esprimibile in [Watt] che si propaga in tutte le direzioni.

Irradianza (Densità del flusso radiante incidente)

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

La densità del flusso radiante è l'energia radiativa che viene immagazzinata da una unità di superficie del corpo nell'unità di tempo, essa equivale ad una potenza per unità di area esprimibile in $[W/m^2]$.

Exitanza (Densità del flusso radiante emettente)

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

La densità del flusso radiante è l'energia radiativa che viene emessa da una unità di superficie del corpo nell'unità di tempo, essa equivale ad una potenza per unità di area esprimibile in $[W/m^2]$.

2.7 INTERAZIONE DELLA RADIAZIONE CON LE SUPERFICI NATURALI

La radiazione che colpisce una superficie (corpo grigio) è in parte assorbita, riflessa e trasmessa.

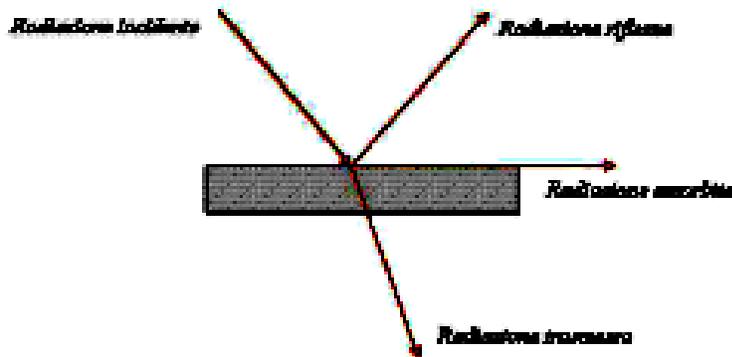


Figura 4 Interazione con le superfici

Possono essere definiti coefficienti adimensionali che valutino la componente dell'energia che viene di volta in volta assorbita, riflessa e trasmessa.

Φ_i Flusso radiante incidente

Φ_a Flusso radiante assorbito

Φ_r Flusso radiante riflesso

Φ_t Flusso radiante trasmesso

In funzione di queste grandezze si possono definire:

Assorbenza $\alpha = \alpha(\lambda) = \frac{d\Phi_a}{d\Phi_i}$ Rapporto tra energia assorbita ed energia

incidente

Riflettanza $\rho = \rho(\lambda) = \frac{d\Phi_r}{d\Phi_i}$ Rapporto tra energia riflessa ed energia

incidente

Trasmittanza $\tau = \tau(\lambda) = \frac{d\Phi_t}{d\Phi_i}$ Rapporto tra energia trasmessa ed energia

incidente

Il comportamento che lo stesso materiale ha nei confronti della radiazione dipende dalla lunghezza d'onda (λ) della radiazione incidente; quindi, ai coefficienti indicati viene aggiunto l'aggettivo spettrale per indicare tale relazione.

La componente principale, sulla quale si basano le misurazioni radiometriche, è la riflettanza perché, alle lunghezze d'onda sulle quali si è soliti operare, diventa la grandezza più significativa.

Consideriamo ora solo la parte di energia riflessa (ρ) dalla superficie.

La misurazione della riflettanza è funzione della tipologia della superficie ed il valore misurato varia in base all'angolo di riflessione che è funzione della rugosità dell' oggetto. Il concetto di rugosità è relativo alla lunghezza d'onda: in generale le superfici lisce riflettono in modo speculare (angolo incidente uguale a angolo riflesso) e le superfici perfettamente rugose si comportano da riflettori lambertiani (la direzione di riflessione è indipendente da quella incidente). Le superfici reali hanno un comportamento intermedio rispetto a questi due casi limite. Il criterio di Rayleigh consente di valutare quanto una superficie si possa considerare rugosa considerando il raggio che la colpisce mediante la formula:

$$\Delta h \geq \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta}$$

dove:

h è la dimensione verticale media delle asperità superficiali della superficie [m];

λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente [m];

θ è l'angolo di incidenza dell'onda elettromagnetica rispetto alla verticale [rad].

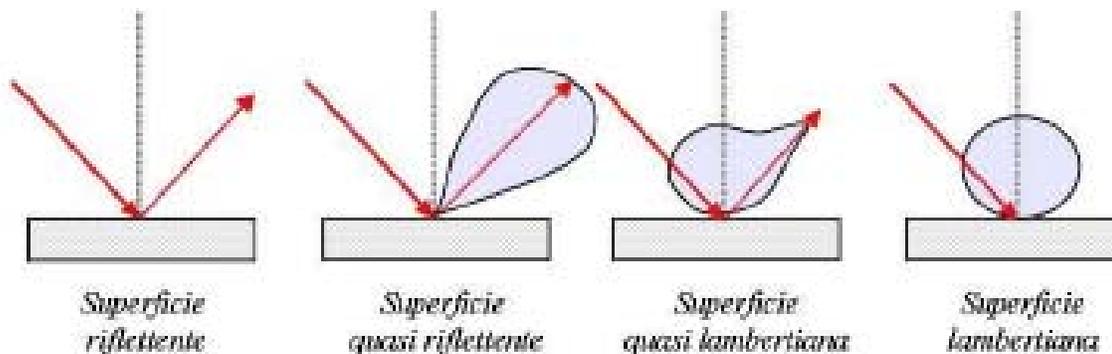


Figura 5 Comportamento delle superfici

Esiste poi una particolare superficie che non si comporta né da superficie speculare né da superficie lambertiana: si tratta delle superfici così dette retro-riflettenti. Per queste particolari superfici il raggio riflesso si propaga esattamente lungo la stessa direzione del raggio incidente. Questa proprietà è valida inoltre per un elevato numero di direzioni di incidenza.

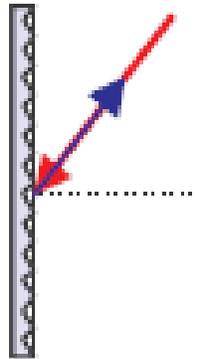


Figura 6 Comportamento delle superfici retro-riflettenti

Il problema della direzione preferenziale del raggio riflesso si traduce, in termini pratici, in una diversa captazione della riflettanza. Per le superfici lambertiane la direzione nella quale viene captata la radiazione non influisce nel valore misurato perché, mediante la legge di Lambert, o del coseno, è possibile risalire da qualsiasi angolazione di presa al valore di riflettanza nella direzione zenitale, semplicemente moltiplicano per il coseno dell'angolo incidente. Per le altre tipologie di riflessione, la riflettanza deve essere misurata nella direzione preferenziale della riflessione (Bornaz, 2004)

2.8 IL PROBLEMA DELLA DIVERGENZA DEL RAGGIO LASER

Le proprietà del raggio laser sono quelle di essere una radiazione elettromagnetica:

monocromatica

coerente

direzionale

In alternativa si può definire il raggio laser come una radiazione luminosa concentrata monocromatica formata da onde parallele in fase tra loro. Nella realtà dei fatti però la condizione di direzionalità è difficilmente raggiungibile. I fasci che compongono un'emissione laser infatti sono “praticamente” paralleli, ovvero sono affetti da una leggera divergenza che, entro distanze ridotte, è assolutamente irrisoria e quindi praticamente inesistente. Il fenomeno della divergenza del raggio laser è legato alle dimensioni limitate della cavità nella quale si produce il raggio laser così come al fenomeno di diffrazione imposto dalla finestra d'uscita del fascio.

La divergenza del raggio fa in modo che la zona reale di impatto sia invece un'area (in genere abbastanza piccola). Nel rilevamento laser scanner la determinazione della posizione dei punti acquisiti è come noto effettuata utilizzando un raggio laser. Se il punto colpito dal raggio non è puntiforme ma areale, la misura di posizione effettuata è funzione dell'area di impatto. Questo fenomeno si traduce in un lieve disturbo nella determinazione della posizione del punto acquisito ed è funzione della grandezza dell'area di impatto del laser e della geometria della superficie colpita. In generale è possibile affermare che meno elevato è il valore di divergenza del raggio più risulta precisa la misura della posizione del punto considerato.

2.9 SENSORI LASER SCANNER TERRESTRI

Un sistema di laser a scansione fornisce, come risultato del rilievo, un insieme di punti in tre dimensioni che viene denominato nuvola. Le

coordinate tridimensionali di questi punti vengono espresse in un sistema di riferimento rispetto al centro strumentale; l'acquisizione dei punti avviene in modo automatico e la nuvola di punti descrive la superficie dell'oggetto scansionato, l'elevata velocità di acquisizione è in grado di far acquisire centinaia o migliaia di punti al secondo.

I sensori possono essere classificati in diversi modi: la distinzione più immediata è quella di discriminarli in base alla metodologia di acquisizione utilizzata. Verranno presentati nel seguito le principali strumentazioni presenti sul mercato, ma ne esistono altre, per esempio quelle che utilizzano la proiezione di luce strutturata. (Boehler et al., 2004)

2.10 LASER SCANNER DISTANZIOMETRICI

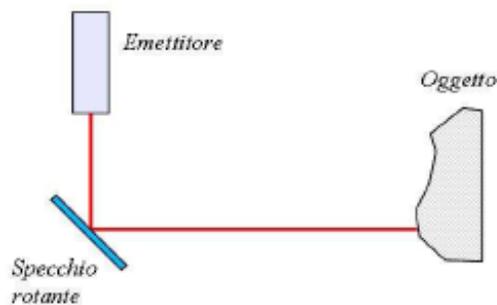


Figura 7 Schema di funzionamento di un laser scanner distanziometrico

I laser scanner distanziometrici possono essere facilmente paragonati alle stazioni totali topografiche, anche se esiste però una sostanziale differenza tra le due metodologie di rilievo. Quando si effettua un rilievo topografico classico, vengono misurati i punti più significativi dell'oggetto da acquisire, ed essi devono essere ben riconoscibili nel contesto. Un rilievo con l'ausilio della tecnologia laser non consente nessuna discriminazione dei punti che vengono rilevati in automatico. Solitamente si definisce solo l'area che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata. Definiti questi parametri l'acquisizione è completamente automatica, il raggio laser viene

indirizzato, mediante componenti ottico meccanici in rotazione, sulla superficie da rilevare variando a passi discreti gli angoli azimutale e zenitale. Il risultato del rilevamento è una nuvola di punti molto densa, i punti con coordinate note sono distribuiti in modo casuale sull'oggetto. Non sono quindi in genere rilevati i punti che classicamente sono misurati con le tecniche di topografia classica. I laser scanner distanziometrici in genere sono dotati di distanziometri laser ad impulsi (che misurano quindi un tempo di volo) in quanto permettono di effettuare misure molto velocemente (circa 10000 pti/sec) con precisioni elevate (dell'ordine dei 5 – 10 mm). La portata massima oggi raggiungibile con un sensore laser di classe 1 (quindi non pericoloso per la vista) è di circa 800 m. Se la distanza viene invece misurata per differenza di fase, lo strumento è più lento ma più preciso e la portata di acquisizione diminuisce.

2.11 DISTANZIOMETRI LASER

Le coordinate dei punti vengono individuate utilizzando la misura dei due angoli, azimutale e zenitale, e la misura della distanza tra il punto collimato e il centro strumentale. La distanza può essere misurata, a seconda della tecnologia utilizzata con:

Distanziometri ad impulsi: valutano la distanza misurando i tempi trascorsi tra due impulsi o tra due treni d'onda, misurano così il tempo di volo (*time of flight*) tra l'emissione e il ritorno del segnale.

Distanziometri a misura di fase: misurano la distanza dell'oggetto valutando la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta.

A seconda della tecnologia che viene utilizzata sugli strumenti laser a scansione possono raggiungere precisioni diverse. Gli strumenti sul mercato utilizzano solitamente dei distanziometri ad impulsi; si possono così ottenere precisioni nell'ordine di 4-6 mm a circa 100 m se si utilizza un

raggio di classe 1. Le portate ottenibili con distanziometri ad impulsi a oggi possono, al massimo, arrivare a 600-800 m; per migliorare la distanza si potrebbe utilizzare prismi riflettenti ma questi strumenti non possono essere utilizzati in sistemi di rilievo laser perché vengono posizionati per la collimazione di un solo punto per volta.

2.11.1 DISTANZIOMETRI AD IMPULSI

Il principio su cui si basa questo metodo di misura della distanza è concettualmente semplice. Si tratta di misurare il tempo Δt impiegato da un impulso luminoso per andare dal distanziometro al riflettore e viceversa.

Nota la velocità di propagazione dell'impulso è possibile calcolare la distanza percorsa:

$$2D = v\Delta t$$

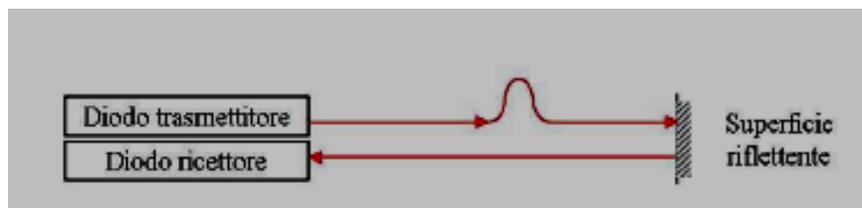


Figura 8 propagazione dell'impulso

Le prime applicazioni di questo metodo sono state realizzate in ambito militare e nei sistemi di misura satellitari S.L.R. (Satellite Laser Ranging). In questo caso particolare l'impulso emesso, di tipo laser, possedeva tuttavia potenze tali da non essere applicabile in campo civile costituendo un pericolo per la vista. La potenza emessa è oggi facilmente variabile e può, quindi, essere resa compatibile con le esigenze degli impieghi civili. Di maggiore rilievo è invece il problema della precisione richiesta per le applicazioni di tipo geodetico e topografico. Affinché la distanza D abbia una precisione di 10^{-5} occorre che sia le grandezze v (velocità) che Δt (intervallo di tempo misurato) siano determinabili con la medesima

precisione. Nell'ipotesi approssimativa che $v = c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, si ha che Δt deve avere una precisione di 10^{-5} , cioè la sensibilità deve essere:

$$\frac{\delta\Delta t}{\Delta t} = 10^{-5} \rightarrow \delta\Delta t = 10^{-5} \Delta t$$

Il diodo viene attraversato per un tempo ristrettissimo, 12 ns, da una forte corrente di 20 ÷ 30A ed emette un fascio di luce laser. La corrente è costante e stabilizzata in questo brevissimo intervallo. Dopo un intervallo di tempo Δt arriva al ricevitore il segnale di ritorno. Per distanze superiori l'orologio di riferimento determina in modo esatto solo il numero di lunghezze d'onda, contenute nell'intervallo di tempo Δt tra il segnale emesso e quello ricevuto.

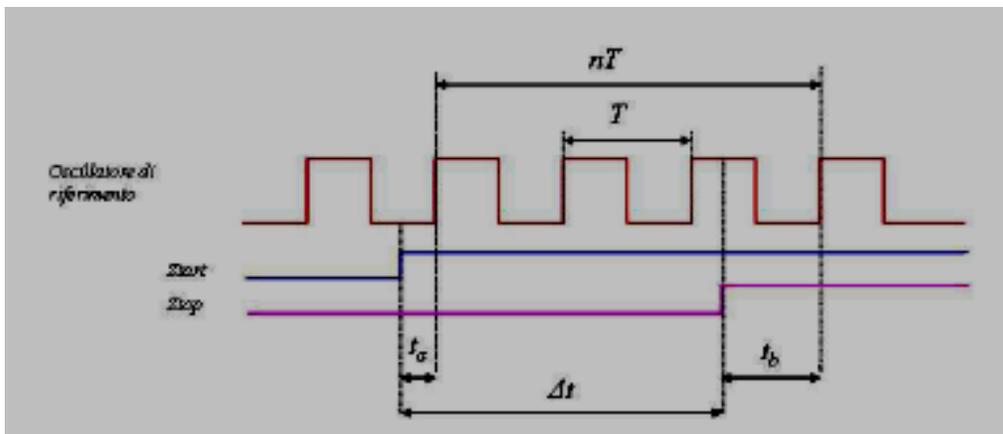


Figura 9 Schema di funzionamento del distanziometro ad impulsi

Chiamando con T il periodo della frequenza fondamentale f (il periodo T sarà pari a $1/f$), l'intervallo Δt tra lo Start (partenza del segnale) e lo Stop (arrivo del segnale) sarà:

$$\Delta t = nT + t_a - t_b$$

Per distanze minori di 10 m il valore è uguale a zero. Il valore di n è noto in quanto la distanza approssimata è nota con precisione migliore del decametro. Una precisione dell'ordine del decametro non è però sufficiente

nel campo del rilevamento di una distanza in topografia o nelle applicazioni affini. E' necessario quindi procedere ad un affinamento della misura del tempo entro un periodo di oscillazione (T). Il tempo impiegato dall'impulso è pari al numero di periodi interi trascorsi (nT) e dai tempi residui compresi tra lo Start (t_a), lo stop (t_b) e la prima oscillazione di riferimento immediatamente successiva. Ciò è dovuto al fatto che l'oscillatore di riferimento viene attivato all'accensione dello strumento e non al comando di start dell'impulso, con il quale, quindi, non risulta in genere sincronizzato. Per misurare con precisione t_a e t_b si usa un convertitore tempo tensione: esso è costituito da un condensatore che viene caricato, per i tempi in oggetto, da una corrente costante. Essendo nota la tensione raggiunta per un tempo di carica corrispondente ad un periodo di oscillazione (T), è facile ricavare, con una semplice proporzione, i tempi residui richiesti in funzione della tensione in essi raggiunte dal condensatore.

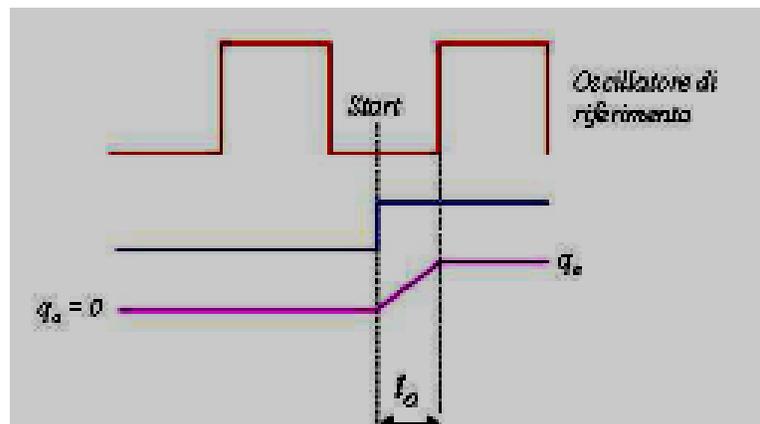


Figura 10 Schema della valutazione dei tempi di un distanziometro ad impulsi

Indicando con q la tensione raggiunta dal condensatore nel tempo t e con Q la tensione raggiunta nel periodo T si avrà:

$$\frac{t}{q} = \frac{T}{Q}$$

Con t si indicano successivamente t_a e poi t_b . Dopo ogni misura di tensione ed entro un intervallo che al massimo deve durare un ciclo, il condensatore viene scaricato. Questo condensatore viene cioè aperto dal segnale di *start* e chiuso dalla prima rampa del segnale dell'oscillatore. Per la misura di t_b , essendo il segnale ricevuto molto debole, si preferisce fare la misura dopo aver modulato questa emissione con la frequenza data dallo stesso circuito di oscillazione. Un "circuito rivelatore di zero" misura t_b come primo zero della sinusoide smorzata, che si ottiene come risultato di detta operazione. Per poter effettuare misure di tempo così precise non si può prescindere dai ritardi di fase dell'orologio interno, dovuti ai ritardi parassiti dell'elettronica dei circuiti interni o di altri sistematismi qui non più trascurabili. Per questo motivo, oltre alla misura del tempo sul segnale di ritorno, avviene anche una misura interna di calibrazione, catturando, prima dell'uscita, una parte del segnale emesso e misurandone il tempo di percorrenza nei circuiti, cioè a distanza nulla. Questi tempi assumono valori rilevanti in relazione ai tempi normalmente in gioco (ad es. si possono avere ritardi di $100 \mu s$ cui corrisponderebbe una distanza misurata di circa 15 km). Poiché entrambi i segnali percorrono lo stesso circuito interno, sottraendo al tempo misurato quello di calibrazione, è possibile ricavare il tempo del solo percorso esterno.

La seguente tabella presenta le società che commercializzano sistemi laser a scansione a tempo di volo.

Azienda e sito web	Caratteristiche del laser e applicazioni	Range di azione	Precisione dich.
Optech (www.optech.on.ca)	Laser radar a lungo raggio	500 – 4000 m	5 – 25 cm
Leica (www.leica.com)	Laser radar ad elevata precisione	300 m	4 mm
Riegl – LMS-Z210 (www.riegl.co.at)	Laser a lungo raggio	100 – 650 m	6 – 15 mm
Noptel (www.noptel.fi)			2.5 mm
Acuity Research – AR 4000		16.45 m	2.5 mm
Mensi (www.mensi.com)			
Metric Vision (www.metricvision.com)	Laser radar a frequenza modulata	1 – 24 m	16 – 240 μm
IQSun GmbH (www.iqsun.com)	Laser radar con compensazione interna della temperatura	50 m	2 – 5 mm
Bushnell (www.bushnell.com)	Applicazioni sportive	0.40 – 7 m	25 – 150 μm

Tabella 1 Aziende che producono laser a tempo di volo

2.11.2 DISTANZIOMETRI A MISURA 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; questo 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 ed 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. Bisognerà quindi modulare opportunamente l'onda elettromagnetica. Prendiamo ad esempio il caso di un'onda con una lunghezza d'onda (λ) qualsiasi e supponiamo di voler misurare, utilizzando questa 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.

Azienda e sito web	Caratteristiche del laser e applicazioni	Range di azione	Precisione di misura
Zöllner + Fröhlich GmbH (www.zf-laser.com)	A specchio rotante	Fino a 79 m	1 – 2.5 mm
Basis Software Inc. – SurPhaser (www.surphaser.com)	Per elevate precisioni	0.40 – 7 m	25 – 150 µm
Faro (www.faro.com)	A specchio rotante	20 – 250 m	1 – 3 mm
[TC] ² Body Measurement Sys. (www.tc2.com)	A differenza di fase	1 – 50 mm	

Tabella 2 Ditte che producono laser a misura di fase

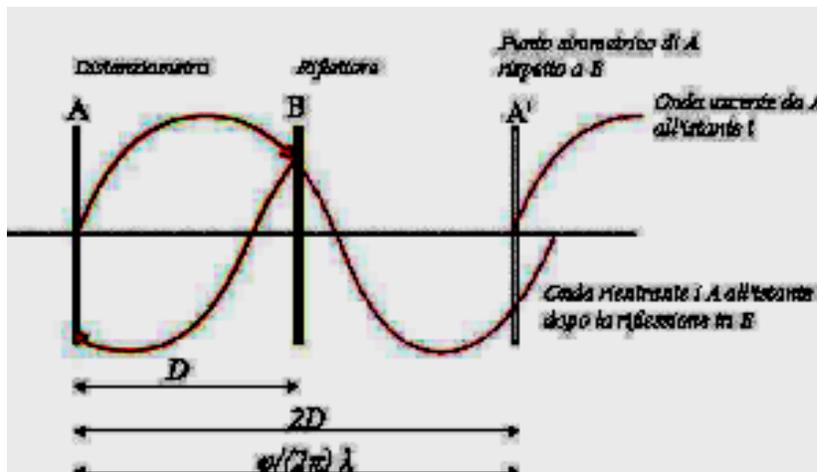


Figura 11 Distanziometro a misura di fase

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' una quantità pari ad 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 il generico istante t è possibile scrivere il valore dell'ampiezza dell'onda:

$$S = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$$

dove:

S = ampiezza dell'onda

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

$$\Delta t = \frac{2D}{c} \text{ avremo:}$$

$$S_r = A \cdot \sin(\omega(t - \Delta t) + \varphi_0)$$

$$S_r = A \cdot \sin(\omega t - \omega \Delta t + \varphi_0)$$

$$S_r = A \cdot \sin(\omega t - \varphi + \varphi_0)$$

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:

$$\varphi = \omega \Delta t = \omega \frac{2D}{c}$$

$$2D = \frac{c \cdot \varphi}{\omega} = \frac{c \cdot \varphi}{2\pi f} = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda$$

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Da cui si può dedurre che, misurando lo sfasamento $\Delta\varphi$ tra l'onda uscente e l'onda rientrante, 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:

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} + n \frac{\lambda}{2} \rightarrow D = L + n \frac{\lambda}{2}$$

Il numero intero n si chiama ambiguità. Per misurare una distanza con un distanziometro ad onde occorre quindi misurare lo sfasamento φ_0 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, 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_0 e l'ambiguità n .

2.12 LASER SCANNER TRIANGOLATORI

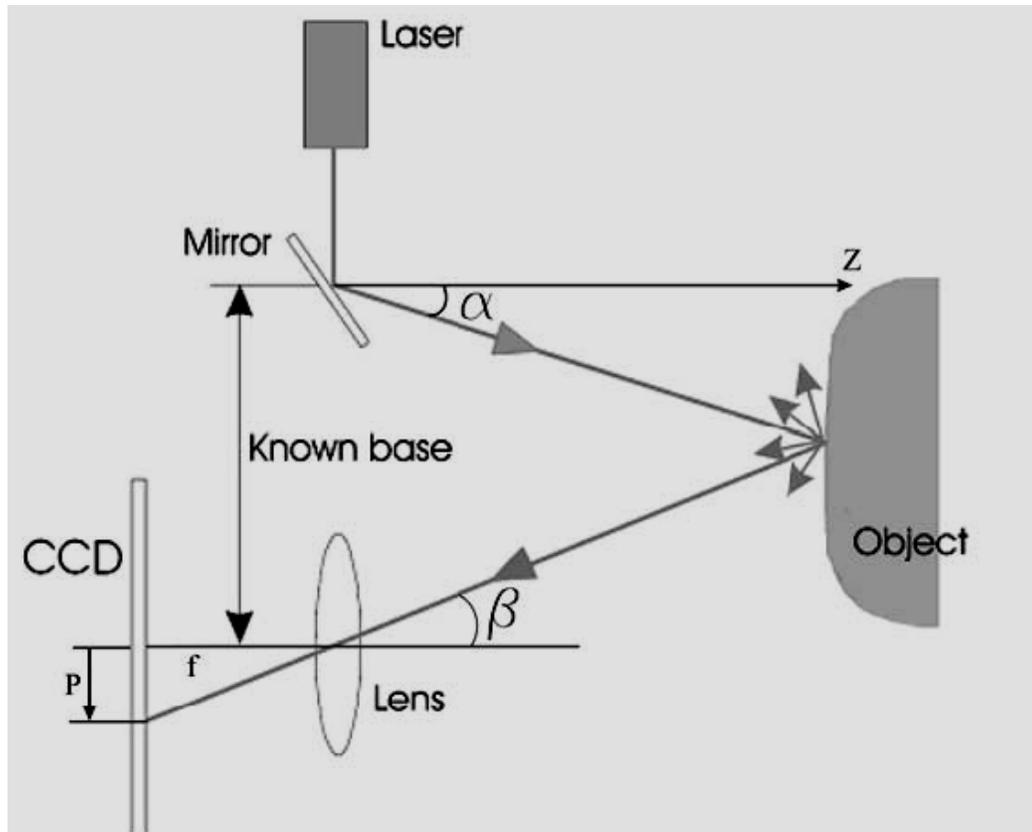


Figura 12 Schema di funzionamento di un laser scanner triangolatore

I laser scanner triangolatori sono strumenti che, per la misurazione della posizione di punti, utilizzano il principio della triangolazione in topografia. Questi scanner sono costituiti da un raggio laser che, deflesso secondo un passo incrementale mediante uno specchio rotante, colpisce l'oggetto secondo una scansione regolare; il segnale riflesso (punto o linea laser) viene catturato da uno o più sensori di immagine a stato solido CCD o CMOS, posti ad una distanza prefissata e calibrata (base) rispetto al punto da cui il laser viene inviato all'oggetto; il laser ed il sensore sono contenuti in un'unica unità chiamata scanner head.

La precisa conoscenza della geometria che lega il laser alla camera consente, con l'impiego dei teoremi geometrici di Talete, di determinare la posizione del punto dell'oggetto rilevato; in particolare la profondità z come funzione degli angoli α , β e della base nota d , vale:

$$z = \frac{d \cdot \operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg} \alpha}$$

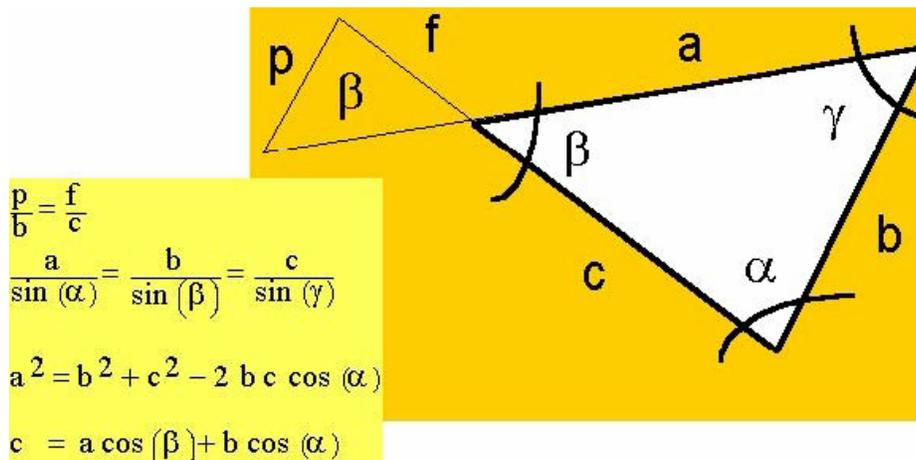


Figura 13: Elementi di base della geometria di Talete

Si osservi che mentre a viene misurato direttamente, β viene calcolato in modo indiretto misurando P (che viene rilevata su un sensore CCD o CMOS) ed essendo nota la focale f (caratteristica costruttiva della camera). Si tratta di strumenti di forma allungata o a tubo dotati di un diodo emettitore e di un diodo ricevente posizionati agli estremi dello strumento stesso. Il segmento che unisce i due diodi è chiamato comunemente base e la sua dimensione non può in genere superare alcuni limiti pratici di maneggevolezza (circa 1 m). Ne consegue ovviamente un limite nella portata dello strumento. Per la determinazione della posizione del punto acquisito si utilizzano la base (di entità nota in quanto caratteristica intrinseca dello strumento) e due angoli (che sono misurati in fase di

acquisizione e sono: l'angolo che si forma tra il raggio emesso e la base dello strumento e l'angolo che si forma tra il raggio riflesso e la base).

Una variante a questo strumento è quella che lavora con l'ausilio di due camere CCD. Tale geometria di acquisizione consente di ottenere precisioni molto elevate (sub-millimetriche) portate limitate (dell'ordine di qualche metro) e tempi di acquisizione mediamente elevati.

Azienda e sito web	Caratteristiche del laser e applicazioni	Range di azione	Precisione dich.
Steintek (www.steintek.de)	Braccio su struttura meccanica multi – asse	10 – 77 cm	20 – 300 µm
ShapeGrabber (www.shapegrabber.com)	Piano di luce su supporto traslante o ruotante	40 – 650 mm	25 – 200 µm
Cyberware (www.cyberware.com)	Vari prodotti per diversi utilizzi		50 – 200 µm
3Dscanners – Model Maker (www.3dscanners.com)	Laser portatile a mano su braccio meccanico		
RVSI/Abante automation (www.rvsi.com)	Sistemi per l'indagine di semiconduttori elettrici		2.25 µm
Minolta – Vivid systems (www.konicaminolta-3d.com)	Vari prodotti per diversi utilizzi	50 mm – 2.5 m	100 µm – 7 mm
Kreon (www.kreon3d.com)	Slit scanner per macchine CMM/CNC ¹	50 – 100 mm	10 – 25 µm
Cyberoptics (www.cyberoptics.com)	Sistemi per l'indagine di semiconduttori elettrici		
Integrated Vision Products (www.ivp.se)	Slit scanner molto veloci		
Virtek Vision International (www.virtekvision.com)	Laser a linee multiple per prodotti industriali	25 mm	100 µm
Hamamatsu – Body scanner Usa.hamamatsu.com	Sistemi per il body scanning completo	0.5 – 2 m	
Virtual 3d Tech (3d.itri.org.tw)	Slit scanner	400 mm	0.1 – 0.2 mm

Metris (www.metris.be)	Slit scanner a braccio per macchine CMM/CNC	100 mm	5 – 12 µm
Nagoya Inst. Of Technology (hilbert.elcom.nitech.ac.jp)	Slit scanner	300 mm	1 – 2 mm
DLR (www.robotic.dlr.de)	Single spot a testa rotante per applicazioni di robotica		
GIE Tech. – Laser Vision (www.gietech.com)	Slit scanner a proiezione multipla per applicazioni stradali		
Servo Robot Inc. (www.servorobot.com)	Indagini industriali		
Arius3D (www.arius3d.com)	Sistemi ad alta precisione		
Laser Design In. – Surveyor (www.laserdesign.com)	Linea di prodotti dai portatili a montati su macchine CMM		
Trimble (www.trimble.com)	Sistemi a base larga	Fino a 25 m	0.2 – 0.6 mm
Vitronic (www.vitronic.com)	Dalle indagini industriali al body scannino		
Polhemus (www.polhemus.com)	Scanner portatili a mano e leggeri		
Nextec (www.nextec-wiz.com)	Bracci per macchine CMM		
3D Digital Corp (www.3ddigitalcorp.com)	Slit scanner	300 – 900 mm	15 – 120 µm
Perceptron (www.perceptron.com)	Laser portatili a mano o per macchine CMM		
Scantech (www.scantech.com)	Slit scanner a doppia camera	40 – 400 mm	20 – 200 µm
Micromesure (www.micromesure.de)	Slit scanner		
Roland – Picza	Per oggetti su tavola rotante		
Metricvision (www.metricvision.com)	Slit scanner	65 – 195 mm	8 – 20 µm
Steinbichler Optotechnik (www.steinbichler.de)	Slit scanner portatili a mano		
Wolfbeck (www.wolfbeck.com)	Braccio ad apertura circolare		
Dipix (www.dipix.com)	Indagini in linea sul cibo industriale		
LMI Technology (www.lmint.com)	Vari prodotti per tutte le applicazioni		
Acuity Research (www.acuityresearch.com)	A braccio	6 mm – 16.5 m	
Taicaan (www.taicaan.com)	Braccio singolo con supporto traslante	2.5 mm	2 µm
Steintek (www.steintek.de)	Slit scanner	100 – 600 mm	200 µm

Tabella 3 Ditte produttrici laser a scansione triangolatori

I laser a scansione possono anche essere classificati basandosi secondo altri criteri discriminatori quali, ad esempio, la portata del sensore laser. Possiamo così ottenere:

- ✓ Laser a piccola portata: sono generalmente laser triangolatori con portate minori del metro e precisioni sub millimetriche.
- ✓ Laser a media portata: le portate sono comprese tra 1 e 50 m con precisioni da 0,2 a 6 mm, possiamo avere sia laser distanziometrici che triangolatori.
- ✓ Laser a lunga portata: possono essere utilizzati fino a distanze di circa 1 Km le precisioni di queste strumentazioni sono comprese tra i 5 mm e i 2 cm

Se la classificazione è effettuata in base a come il sensore laser può essere posizionato possiamo distinguere in:

Laser statici: generalmente utilizzati su linee di controllo meccanico, essi hanno posizione fissa ed acquisiscono sempre una stessa scena.

Laser mobili: sono utilizzati nel rilievo topografico, sono di dimensioni ridotte e posizionati su treppiedi.

2.13 FORMATI PER LO SCAMBIO DEI DATI

L'obbiettivo che si cerca di perseguire è quello di utilizzare formati, per il salvataggio dei file, che siano il più possibile standard e che vengano utilizzati dal numero più ampio possibile di produttori di software. Un committente si aspetta di ottenere non solo i dati grezzi delle misurazioni ma, per conseguire uno standard di consegna elevato, è necessario che i dati contengano informazioni aggiuntive come foto, descrizioni e piante. Sono molto importanti i metadati che descrivano i dati ottenuti con informazioni tecniche riguardanti la metodologia tecnica di acquisizione dei dati. I dati grezzi del rilievo (per esempio le singole nuvole salvate in file separati) dovranno sempre essere consegnati e, separatamente, si potranno consegnare i dati elaborati già allineati con descrizione della trasformazione

di coordinate eseguita. Parte integrante dello standard di consegna è il formato nel quale sono salvati i file. I formati con i quali verranno consegnati i file dovranno essere visibili dagli utenti con semplici programmi di visualizzazione, dovrà essere consentita una archiviazione efficiente con l'ausilio di metadati e dovrà anche essere possibile utilizzare il formato con programmi di modellazione geometrica. Un qualsiasi software ha due possibilità di memorizzare i dati in formato ASCII oppure in formato binario (Barber et al., 2005).

2.13.1 FORMATO ASCII

E' una metodologia di salvataggio dei dati che utilizza file di testo. I vantaggi di questa tipologia di formato sono molteplici: utilizzando file di testo la comprensione del contenuto è molto facilitata per qualsiasi tipo di utente e per qualsiasi tipo di programma ed è possibile utilizzare programmi non distruttivi per la compressione dei dati (tipo ZIP). Il tipo di file utilizzato porta anche a svantaggi che possono portare a privilegiare altri tipi di formato. Questa tecnica di archiviazione infatti porta ad avere una dimensione dei file molto elevata che può essere una limitazione all'utilizzo. Un altro punto a sfavore è dato dall'assenza completa di specifiche che possono portare ad un'errata comprensione dei dati.

2.13.2 FORMATO BINARIO

I dati forniti in questo formato devono essere completati attraverso specifiche, senza le quali la comprensione è seriamente compromessa. In alternativa alle specifiche è necessario disporre di API (Application Program Interfece) che consentano di interpretarlo. Le API vengono utilizzate dal programmatore che crea il software per consentire il salvataggio in un determinato formato. I vantaggi di questo formato derivano dal fatto che utilizzando specifiche rigide, il file è abbastanza ricco di dati e lo spazio occupato in memoria non è eccessivo. Le

peculiarità negative sussistono in quanto le specifiche, se non sono pubbliche, limitano fortemente il bacino di utenza di quel particolare tipo di file. La stessa cosa avviene se il programma che utilizza il file diventa obsoleto: le specifiche diventano introvabili e il file non può essere più utilizzato.

2.14 FORMATI ESISTENTI SUL MERCATO

I file che vengono utilizzati maggiormente per lo scambio di dati tra software diversi sono i file XYZ che possono essere salvati in formato sia ASCII che BINARIO. I file XYZ sono standard e servono solo per descrivere i punti; non posso salvare quantità aggiuntive come l'RGB. Un file abbastanza innovativo è il LAS: questo tipo di file consente di salvare molte più informazioni del XYZ come per esempio i valori RGB, i metodi di classificazione utilizzati e le operazioni eseguite per l'allineamento. Le specifiche sono pubbliche e sono disponibili delle API per poter scrivere e implementare il file in software. Altri tipi di file in formato BINARIO sono i PTX e PTS che sono stati creati dalla ditta Leica geosistem. (Barber et al., 2005)

Le caratteristiche che dovrebbe avere un formato ideale sono:

- ✓ Essere di pubblico dominio
- ✓ Avere la possibilità di essere compressi con metodi non distruttivi o essere in formato binario
- ✓ Essere capace di poter contenere numerose informazioni definibili dall'utente
- ✓ Dare la possibilità di inserire metadati e informazioni culturali per migliorare l'archiviazione.

2.15 CONFRONTO DELLE PRECISIONI TRA STRUMENTI LASER DIVERSI

La tecnologia laser scanner terrestre si è evoluta nel campo del rilievo dei Beni Culturali soprattutto negli ultimi dieci anni e per questo motivo non è stata ancora predisposta una metodologia standard per le procedure ed il controllo di qualità di un rilievo di questo tipo.

In ambito anglosassone l'English Heritage, l'organismo responsabile della conservazione e della valorizzazione dei beni culturali inglesi, ha mantenuto uno standard di precisione per tutti i rilievi di tipo metrico effettuati negli ultimi otto anni.

Nell'ambito dei sistemi TLS (Terrestrial Laser Scanning) una standardizzazione è piuttosto complicata, soprattutto per la varietà dei sistemi in commercio.

Per ottenere un approccio strutturato, la progressione logica di un rilievo con laser scanner è stata suddivisa in tre segmenti tra loro correlati: acquisizione dei dati, utilizzo ed archiviazione.

Per quanto riguarda la fase di acquisizione dei dati, si può dire che questa è fortemente dipendente dallo strumento utilizzato, quindi è consigliabile richiedere un certificato di buon funzionamento dello strumento, oppure un test dettagliato eseguito nell'ultimo anno, che dimostri che lo scanner è in grado di fornire la precisione e l'accuratezza richieste.

SCALA	EFFETTIVA DENSITA' DEI PUNTI	PRECISIONE	USI
1:10	2.0 mm	+/- 2.0 mm	Piccoli dettagli/oggetti (sino a 5m x 5m)
1:20	4.0 mm	+/- 4.0 mm	Grandi dettagli/oggetti (sino a 10m x 10m)
1:50	15.0 mm	+/- 15.0 mm	Piccole strutture (sino a 20m x 30m)
1:100	25.0 mm	+/- 25.0 mm	Grandi strutture (sino a 40m x 60m)

Tabella 4 Requisiti di un rilievo laser secondo la scala

Affinché l'acquisizione risponda ai requisiti richiesti dai committenti è necessario specificare, nella fase preliminare, quale sarà la dimensione dell'impronta del raggio laser, che non può superare il doppio della densità dei punti, il numero e la posizione delle scansioni, al fine di non ottenere delle lacune nei dati, il grado di sovrapposizione tra scansioni adiacenti ed in quale modo filtrare i dati per implementare le performance del software.

Eseguito il rilievo, per poter controllare l'accuratezza ottenuta, è possibile utilizzare dei punti di controllo, le cui coordinate, derivate dal modello tridimensionale ottenuto mediante TLS, vengano confrontate con le coordinate dei medesimi punti ottenute mediante strumenti topografici classici.

Per quanto riguarda l'utilizzo dei dati non vi sono ancora specifiche e standard sul tipo e sulle modalità dei prodotti ottenibili; vale ciò che è stato sottolineato nel paragrafo precedente, cioè che il disegno è un prodotto inappropriato per la rappresentazione di un rilievo laser scanner, mentre una corretta rappresentazione si può ottenere mediante un modello tridimensionale, animazioni e filmati, oppure mediante profili e sezioni.

La fase finale del processo è l'archiviazione del dato acquisito, che costituisce una parte vitale del processo di standardizzazione e deve garantire la consultazione dei rilievi anche a distanza di tempo. Il più grande ostacolo, attualmente, è la mancanza di un formato standard per i dati acquisiti, ma in tal senso l'English Heritage ha iniziato a fissare alcune convenzioni per i propri siti sia riguardanti i dati, sia i nomi, sia i metadati. È da rilevare l'importanza di tutte quelle nozioni aggiuntive che rendono ripetibili nel tempo un rilievo ed un'elaborazione mediante TLS. Il progetto deve contenere informazioni riguardanti le varie fasi di elaborazione (filtraggio, registrazione e modellazione), ma anche tutte le informazioni disponibili per individuare correttamente i punti di stazione dello scanner e i punti di controllo, la precisione di tutti i parametri derivati dal processo di registrazione con i rispettivi residui, una descrizione completa della nuvola

di punti e di tutte le lacune conosciute ed infine le note aggiuntive sul sito, come ad esempio le condizioni climatiche in cui è avvenuto il rilievo.

La generazione di queste informazioni può risultare onerosa per l'operatore, ma garantisce la leggibilità del rilievo nel tempo e la possibilità di utilizzare questo tipo di dati per un reale monitoraggio dei cambiamenti che il bene in esame subisce nel tempo.

In conclusione il lavoro di standardizzazione è ancora in fase di definizione, ma è molto utile per sottolineare la necessità di cooperazione con la committenza nel fissare tutti i requisiti che influenzeranno il rilievo e le relative operazioni di elaborazione che determineranno il prodotto finale.

2.16 PRECISIONI OTTENIBILI DA STRUMENTI LASER A SCANSIONE

Quando si parla di accuratezza di un sistema laser a scansione è necessario parlare di ripetitività, in quanto la valutazione dell'accuratezza non può prescindere dalla constatazione che uno strumento di questo tipo rileva l'oggetto per punti singoli, ma nell'unione di più scansioni difficilmente si può ottenere più volte la misura del medesimo punto. Ciò che si ottiene è quindi una ridondanza nella misura di una superficie, ma non nella misura del singolo punto. Per questo motivo ogni punto ha solo un valore di precisione determinato dalla propagazione degli errori di misura dell'angolo, della distanza e degli altri parametri che influenzano la singola misura.

I costruttori di laser scanner forniscono delle specifiche di accuratezza che non sono tra loro confrontabili, poiché vengono riferite ai propri test di laboratorio. Per questo motivo è molto difficile fondare la scelta di uno strumento su questo parametro.

Un test condotto per confrontare le precisioni ottenute da strumenti laser diversi, è stato realizzato dall'Institute for Spatial Information and Surveying Technology di Mainz (Germania) utilizzando un unico target di

riferimento. Gli strumenti sono stati posizionati a 6 metri e a 22 metri dal target e nelle tabelle sottostanti sono visibili i risultati ottenuti dagli esperimenti (a sinistra una sezione della nuvola, a destra i punti rilevati sul piano posteriore del target).

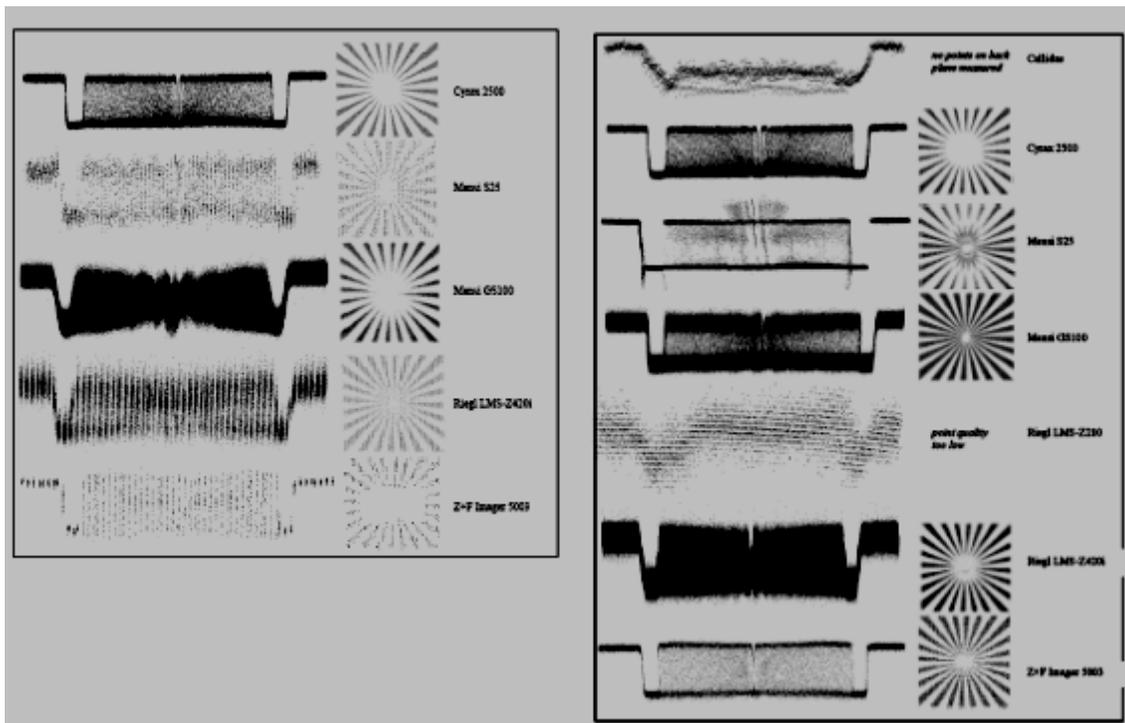


Figura 14: Esempi di qualità dello spigolo in alto high quality, al centro average quality, in basso low quality.

Un altro risultato interessante, evidenziato dall'Istituto di Mainz durante i propri test, è l'effetto del laser sugli spigoli. Questo problema può causare errori il cui ordine di grandezza varia dal millimetro a svariati decimetri ed è inevitabile, a meno che la dimensione dell'impronta del laser non venga settata sulla dimensione del punto da rilevare.

Nella (Figura 15) sono illustrati dei tipici esempi di qualità dello spigolo (in alto high quality, non raggiunto da alcuno scanner, al centro average quality, in basso low quality).



Figura 15 Test sull'effetto del laser sugli spigoli

I sistemi laser scanner dipendono dal segnale riflesso dalla superficie dell'oggetto all'unità ricevente nel caso siano distanziometrici, oppure alla camera nel caso di scanner triangolatori. In entrambi i casi l'intensità del segnale riflesso è influenzata da tanti fattori (distanza, condizioni atmosferiche, angolo di incidenza del raggio), ma anche dalla capacità riflessiva dell'oggetto. Le superfici bianche producono una forte riflessione, mentre le superfici nere riflettono debolmente il raggio; l'effetto delle superfici colorate dipende fortemente dalle caratteristiche del laser, mentre le superfici lucide sono di solito difficili da rilevare. È stato osservato che superfici costituite da materiali con differente riflettività causano errori sistematici nella distanza. Per alcuni materiali questi errori possono raggiungere valori molto superiori alla deviazione standard della singola misura, per questo motivo sono stati costruiti scanner dotati di dispositivi di apertura regolabili, che presentano solamente errori nei primi punti scannerizzati: dopo che il laser ha raggiunto un'area con riflettività molto diversa dalla precedente, viene applicata in modo automatico una correzione nella misura della distanza, raggiungibile solo dopo che alcune misure sono già state effettuate. Per oggetti costituiti da materiali differenti o dotati di colorazione diversa, l'operatore deve aspettarsi errori consistenti. Anche le condizioni ambientali possono modificare la precisione di un rilievo. Infatti ogni scanner funziona correttamente solo in un certo range di

temperatura ed anche all'interno di questo intervallo si possono osservare errori, soprattutto nella misura della distanza. Inoltre è necessario considerare che la temperatura interna allo scanner è sicuramente molto superiore a quella ambientale, sia per effetto della radiazione del sole sia per il calore che lo strumento sviluppa al suo interno.

Per quanto riguarda le condizioni atmosferiche è stato rilevato che, sino a che vengono misurate distanze brevi, la propagazione del laser non risente dei cambiamenti di pressione e temperatura, mentre un effetto simile a quello causato dagli spigoli viene rilevato in presenza di pulviscolo o vapore.

CAPITOLO III

II RILIEVO DELLA SALA DEI CARRACCI A BOLOGNA

Via Zamboni è la grande arteria della cultura bolognese, una strada dedicata alla massima cultura universitaria (con la sede del rettorato), bibliotecaria, musicale (anche con il Museo Civico Bibliografico Musicale), archivistica, museale (Grazie alla Pinacoteca Nazionale e gli importanti musei universitari) e artistica.

In questa strada dedicata a Luigi Zamboni (martire dell'età rivoluzionaria) troviamo uno dietro l'altro molti edifici importanti come Casa Caparra, Palazzo Bianchetti, la Chiesetta di San Donato, Palazzo Malvezzi-De Medici, San Giacomo Maggiore, Palazzo Malvezzi-Locatelli, il Teatro Comunale, Palazzo Paleotti, Palazzo Poggi e Palazzo Magnani. Quest'ultimo, ed in particolare lo splendido salone affrescato dai Carracci, è stato l'oggetto principale della sperimentazione.

3.1 PALAZZO MAGNANI E IL SALONE D'ONORE



L'edificazione di palazzo Magnani si deve a Lorenzo Magnani, che fece demolire alcune case preesistenti di proprietà della famiglia e diede inizio ai lavori di ricostruzione che si protrassero dal 1577 al 1592.

I Magnani, presenti a Bologna dal XIII secolo, si erano insediati in Strà San Donato, attuale via Zamboni, già all'inizio del quattrocento, e abbandonato presto l'antico mestiere di fabbri, cui rimanda il cognome stesso, avevano intrapreso l'attività di banchieri, divenendo una delle più ricche e influenti famiglie di Bologna. Il forte legame con i Bentivoglio valse alla famiglia l'attribuzione del rango senatorio nel 1511, ma li fece in seguito cadere in disgrazia presso papa Leone X, che li escluse dal senato cittadino, nel quale furono reintegrati solo nel 1590 grazie a Sisto V. La decisione di costruire un nuovo imponente palazzo, che fosse espressione evidente e concreta del

rango e della ricchezza dei Magnani, nasce dunque in tali frangenti, dall'intento di celebrare e riaffermare la potenza della famiglia, conquistata partendo da umili origini. La realizzazione dell'edificio venne affidata a Domenico Tibaldi, che organizzò la planimetria con rigore geometrico intorno ad un cortile interno, misurandosi con la non facile conformazione del lotto su cui doveva sorgere il palazzo, e lo dotò di una facciata imponente, nonostante il limitato spazio a disposizione in affaccio sulla via. Il prospetto principale dell'edificio è caratterizzato dall'uso del bugnato manierista per le arcate del portico, al di sopra delle quali si innalza un ordine gigante di paraste, coronato da un cornicione fortemente aggettante, che accentua la monumentalità della facciata. L'ambizioso progetto celebrativo di Lorenzo Magnani, concepito unitariamente sotto l'aspetto architettonico, della decorazione e dell'arredo, ebbe il suo compimento ideale nel ciclo pittorico commissionato ai Carracci per il salone d'onore.

Proprio in questi anni l'esperienza dei Carracci assunse un rilievo nuovo e particolarissimo nella storia dell'arte italiana ed europea: nel 1585 i pittori bolognesi Ludovico Carracci, il cugino Agostino e il fratello di questi Annibale si riuniscono per fondare quella che si potrebbe definire la prima scuola privata di pittura dell'Età Moderna.

La scuola fu inizialmente chiamata Accademia del Naturale, in quanto la sua finalità principale era quella di promuovere negli allievi la riproduzione del vero e di rinunciare alle esagerazioni formali dell'epoca tardo-manieristica; in seguito venne anche detta Accademia dei Desiderosi, per il desiderio di imparare che ne contraddistinse gli allievi; infine fu battezzata come Accademia degli Incamminati allo scopo di sottolineare l'impegnativo percorso di maturazione artistica al quale ogni allievo era chiamato.

I tre Carracci ebbero una formazione eclettica, in quanto abbracciava sia la tradizione classica di Raffaello e Michelangelo, sia la scuola veneziana del colore; questa loro peculiarità appare evidente anche nei fregi di Palazzo Magnani.

Il fulcro della celebrazione della potenza della famiglia Magnani prende forma nel principale ambiente di rappresentanza, la cui decorazione fu affidata appunto ai Carracci, che si erano già distinti nella realizzazione del fregio con le storie di Enea a Palazzo Fava (altro importante edificio bolognese).

Nel 1590, per celebrare il riconquistato rango senatorio, Lorenzo Magnani commissionò ad Annibale, Ludovico e Agostino il ciclo di affreschi con le storie della fondazione di Roma, contribuendo certamente in prima persona a definirne il programma iconografico, che segue puntualmente il racconto delle “Vite parallele” di Plutarco (scrittore greco, ca 46-127 d.C).

Il fregio a riquadri, frequente nei palazzi bolognesi, costituiva infatti una forma di decorazione narrativa particolarmente adatta alla celebrazione, attraverso la rappresentazione della storia di Roma, delle vicende che avevano portato all’affermazione sociale e politica della famiglia Magnani. Ogni episodio contiene precisi riferimenti alle alterne fortune, agli eventi salienti della storia della famiglia o alle qualità dei suoi membri, riassunti dalla frase, quasi una dichiarazione d’intenti, che compare sotto la scena iniziale del ciclo, in cui Romolo e Remo vengono allattati dalla lupa: “Laesi non necati alimur” che in lingua corrente suona come “Feriti, non uccisi, veniamo nutriti”. Dopo la prova di Palazzo Fava, col fregio di Palazzo Magnani avviene la decisiva affermazione del linguaggio innovativo dei Carracci, che chiudono la stagione del manierismo ritornando ad un classicismo costruito sull’osservazione del reale e della natura, dove i paesaggi sono quelli della pianura e dell’appennino bolognese, la narrazione e la rievocazione dell’antico vanno oltre il raffinato gioco intellettualistico per coinvolgere direttamente i sensi di chi guarda.

Le storie della fondazione di Roma hanno inizio sulla parete del camino con Romolo e Remo allattati dalla lupa, continuano con i fratelli che mettono in fuga i ladri degli armenti e con Remo condotto in catene davanti a re Amulio: tutti questi episodi sono allusivi alle difficoltà affrontate dai Magnani per affermarsi battendo i propri nemici.



Figura 1: Parete del camino e particolare del fregio di Palazzo Magnani: Romolo e Remo allattati dalla lupa, i fratelli che mettono in fuga i ladri degli armenti e Remo condotto in catene davanti a re Amulio

Sulla parete di sinistra sono invece rappresentati l'uccisione di Amulio, la costruzione del tempio del dio Asilo sul Campidoglio per accogliere i perseguitati, Romolo che traccia con l'aratro il confine di Roma e il ratto delle Sabine, con le due scene centrali che fanno riferimento alla costruzione del palazzo da parte di Lorenzo Magnani.



Figura 2: Parete e particolare del fregio di Palazzo Magnani: l'uccisione di Amulio, la costruzione del tempio del dio Asilo sul Campidoglio, Romolo che traccia con l'aratro il confine di Roma e il ratto delle Sabine.

La narrazione continua con Romolo che dedica a Giove Feretrio le spoglie del re Amulio da lui ucciso, con la battaglia tra romani e sabini e con l'uccisione di Tito Tazio da parte dei Laurenti.



Figura 3: Parete e particolare del fregio di Palazzo Magnani: Romolo che dedica a Giove Feretrio le spoglie del re Amulio da lui ucciso, la battaglia tra romani e sabini e con l'uccisione di Tito Tazio da parte dei Laurenti.

Sulla parete destra sono rappresentati il castigo divino della pestilenza che si abbatte su Roma, probabile allusione alle epidemie e alle carestie che avevano colpito Bologna negli anni settanta e novanta del cinquecento, il vecchio capitano dei Veienti vinto e schernito, la superbia di Romolo e l'apparizione di Romolo a Proculo, ormai divinizzato come dio Quirino.



Figura 4: Parete e particolare del fregio di Palazzo Magnani: il castigo divino della pestilenza che si abbatte su Roma, il vecchio capitano dei Veienti vinto e schernito, la superbia di Romolo e l'apparizione di Romolo a Proculo.

Ciascuna scena è accompagnata da un motto riportato in un cartiglio sotto ogni riquadro, secondo un procedimento tipico dell'emblematica cinquecentesca, che stabilisce un rapporto strettissimo tra immagini, motto e testo di riferimento del programma iconografico, in questo caso i racconti di Plutarco.

Il salone d'onore è ulteriormente arricchito dal fregio affrescato che corre appena sotto il soffitto: esso forma una fascia suddivisa in quattordici riquadri, intervallati da una partitura architettonica dipinta che continua illusivamente e sottolinea la struttura lignea della copertura.



Figura 5: Copertura lignea con solaio a cassettoni del salone d'onore

I telamoni a monocromo sono infatti posti in corrispondenza delle travi di sostegno del soffitto e paiono portarne il peso, a loro volta sorretti da finte mensole aggettanti. Il gioco di illusioni continua nelle scene, che si inseriscono nel fregio come quadri riportati, cioè come tele nella cornice. L'effetto di quadro nel quadro è esplicitato nella seconda scena, nella quale Remo mette in fuga i ladri di armenti, dove si vede, in alto a sinistra, un finto lembo di tela che pende staccato dal suo supporto.

La complessa partitura decorativa è composta, oltre che dalle finte statue dei telamoni, da putti e satiri, finte statue in bronzo e i finti bassorilievi in marmo giallo.

Floriano Ambrosini, architetto bolognese, dà il suo importante contributo alla residenza dei Magnani completando il palazzo dopo la scomparsa del Tibaldi nel 1583; allo stesso Ambrosini si deve la paternità del camino monumentale della stessa sala sovrastato dall'affresco di Annibale Carracci raffigurante i Ludi Lupericali; alle due estremità le figure di Marte e Minerva modellate in stucco da Gabriele Fiorini.

La statua di Ercole nel cortile interno, sempre opera di Fiorini, raffigura il volto di Lorenzo, senatore e committente del fregio dei Carracci.

Il palazzo fu ereditato nel 1797 dai Guidotti, che lo vendettero nella seconda metà del XIX secolo ai Malvezzi Campeggi, di cui porta ancor oggi lo stemma sulla facciata. Palazzo Magnani fu poi abitato dai Salem e dalla metà del XX secolo è sede della presidenza e della Direzione generale di Unicredit Banca.

Oggi, in alcuni ambienti del piano terreno adiacenti il loggiato è stata allestita la Collezione d'arte antica e moderna Unicredit Banca (ex Rolo Banca 1473) che annovera capolavori databili tra XVI e XX secolo (tra cui D. Dossi, L. Carracci, Guercino, G. M. Crespi, G. Morandi).

3.2 LASER SCANNER FARO LS 880 E SOFTWARE FARO SCENE



Figura 6: Strumento utilizzato Faro LS 880

Lo strumento che è stato utilizzato per il rilievo è il Laser Scanner LS 880 distanziometrico prodotto dalla FARO, le cui caratteristiche tecniche sono riassunte di seguito.

Range: 0,6-70 m

Risoluzione: 17 bit distanza - 9 bit Intensità

Errore Lineare: 3mm a 10 m

Divergenza raggio laser: 0,014°

Diametro del raggio: 3mm

Angolo verticale massimo: 320°

Angolo orizzontale massimo: 360°

Tempo per scansionare un'area: 1.000.000 punti 104 sec

Distanza dei pixel: circa 2.5 cm a 40 m e 3,1 cm a 50 m



Figura 7: Lo strumento Faro LS 880 all'atto del rilievo in Palazzo Magnani.

Faro laser scanner 880 LS è uno strumento innovativo sul mercato: i normali strumenti in uso sono “time-based” (processo basato sul tempo di volo) mentre lo strumento della Faro è “phase-based” (processo basato sul calcolo delle fasi): la differenza fondamentale dal punto di vista operativo è nella velocità di acquisizione dei punti, che è fino a cento volte superiore.

I settori di interesse dello strumento LS 880 sono principalmente: automobilistico, cartaceo, petrolchimico e nell'industria estrattiva; viene inoltre utilizzato dalla polizia Americana F.B.I. nelle istanze giudiziarie. Lo strumento è di semplice utilizzazione e può essere utilizzato dall'utente dopo un breve training con la massima efficienza.

Le caratteristiche che rendono questo strumento innovativo sono principalmente:

- ✓ Immagini 3D fotorealistiche: lo scanner LS 880 produce direttamente le nuvole di punti che possono essere visualizzate come foto in bianco e nero 3D. Ogni pixel corrisponde a una coordinata spaziale XYZ. Attraverso l'acquisizione contemporanea di una macchina fotografica solidale con lo scanner è possibile colorare automaticamente i pixel.
- ✓ Velocità: in meno di un minuto il laser scanner LS può creare una scansione di 8 mega-pixel dell'ambiente. Acquisendo informazioni a questa velocità lo strumento è cento volte più veloce dei normali scanner sul mercato.
- ✓ Modularità: lo scanner è costituito da quattro moduli funzionali: sensore distanza, asse dello specchio, asse orientabile e PC. I componenti funzionali possono essere sostituiti facilmente, così è possibile avere manutenzione più semplice e consentire allargamenti successivi, come per esempio un modulo long-range o un modulo di alta precisione.
- ✓ Testato per l'uso: lo scanner è il risultato di anni di esperienza, è compatto, protetto dalle influenze ambientali, lavora in automatico ed è ottimizzato per l'impiego quotidiano.

Un elemento chiave per un utilizzo che sfrutti appieno le potenzialità dello strumento è il software. La casa produttrice dello strumento fornisce il programma FARO SCENE che è stato utilizzato per l'esportazione dei dati in formato XYZ e per l'applicazione di filtri che consentano un miglioramento delle immagini che saranno utilizzate nel seguito.

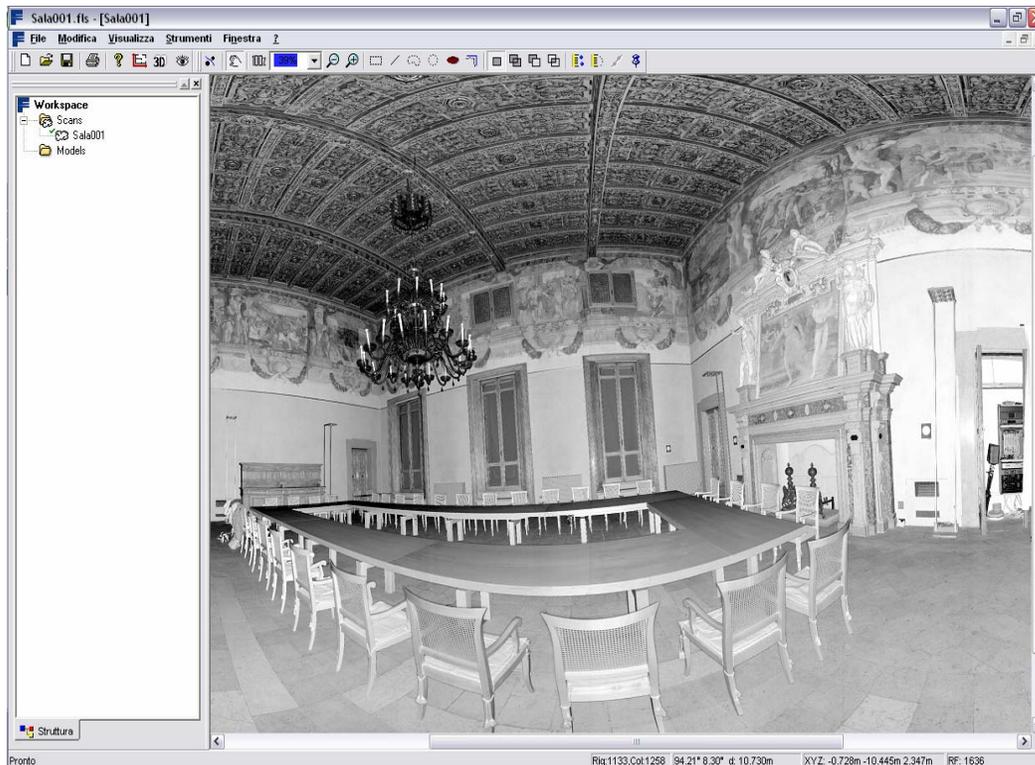


Figura 8: Immagine della visualizzazione piana fornita dal programma Faro Scene

3.3 PROCEDURE DI RILIEVO E DATA PROCESSING

Per eseguire un rilievo in modo soddisfacente, precisione adeguata e completezza di rappresentazione, occorre studiare in modo approfondito sia l'oggetto che si vuole rilevare che lo strumento che si pensa di utilizzare.

Le variabili che possono influenzare la scelta di uno strumento sono dipendenti, oltre che dalla portata e precisione che si vuole ottenere, dalla conformazione dell'oggetto da rilevare (valutazione delle prese necessaria

per una completa visibilità di tutte le sue parti) e dalle condizioni nelle quali si dovrà operare per effettuare il rilievo.

La scelta dello strumento si basa su criteri soggettivi e non univoci, ma è necessario prendere in considerazione alcune caratteristiche operative.

La velocità di acquisizione, messa in relazione alla precisione che si vuole ottenere, è una delle caratteristiche che assumeranno grande importanza. La divergenza e la portata dello strumento subiranno notevoli variazioni a seconda del materiale che verrà collimato. La possibilità di automatizzare operazioni come la scelta di punti o di target e punti pre-segnalizzati, l'autonomia dell'alimentazione confrontata con la durata presunta del rilievo e la possibilità di accoppiare sensori RGB sono caratteristiche che possono orientare la scelta dello strumento da utilizzare.

Un'altra variabile, che condiziona la scelta e che talvolta non dipende direttamente dallo strumento, è il software di gestione abbinato allo scanner.

Ogni scanner viene accoppiato a un programma di gestione che viene fornito dalla casa costruttrice e che consente la lettura e l'esportazione dei dati, il pretrattamento con filtri studiati appositamente per lo strumento (rimozione del rumore, filtraggio e registrazione) e la modellazione dei dati pre-trattati.

Nella fase di pre-trattamento dei dati è possibile eseguire alcune operazioni come: **la visualizzazione, il filtraggio e la pulizia dei dati grezzi, la generazione delle nuvole.**

Nel caso in esame le suddette operazioni di pretrattamento sono state svolte utilizzando il programma, abbinato allo scanner, Faro Scene e nel seguito verranno esposte più nel dettaglio.

Le procedure di rilievo si sono svolte in due sessioni di misura: la prima, utilizzando lo strumento laser scanner è durata all'incirca 2 ore e ha consentito di rilevare circa 20.000.000 di punti con una spaziatura media di 1,5 cm utilizzando cinque stazioni; la seconda è stata svolta

successivamente e ha consentito con l'ausilio di macchina fotografica digitale di ottenere le prese per il texture mapping.

Come detto, la scansione è stata eseguita in un tempo molto breve, intorno alle due ore, comprendendo anche le variazioni di stazione.

Si è trattato dunque di un rilievo speditivo, condizionato anche da vincoli logistici che non ne permettevano il prolungamento. Ciò nonostante, si è cercato di coprire al meglio l'oggetto effettuando stazioni laser da cinque punti della sala, al fine di avere una visuale multipla dei particolari.

Il dato acquisito è quindi costituito da cinque scansioni che successivamente, per esigenze di software, sono state scomposte nelle pareti principali producendo così cinque scansioni per ogni parete e due scansioni di particolari del soffitto. Sono stati applicati, su tutte e quattro le pareti, dei target per agevolare l'allineamento delle scansioni in fase di post processing.



Figura 9: Rilievo laser del Salone d'Onore con evidenziazione di una coppia di target

3.4 GENERAZIONE DELLA NUVOLA DI PUNTI

Una scansione può contenere milioni di punti e a piena risoluzione può richiedere ingenti quantitativi di memoria e risorse. Oltre ai punti, una scansione contiene dati relativi allo stato durante la registrazione, la posizione esatta e l'orientamento. Tutti questi dati sono raggruppati nel file di scansione, ma sono gestiti separatamente in FARO Scene. Il programma è studiato per seguire, passo dopo passo, le operazioni di rilievo in prossimità della stazione; è infatti possibile visualizzare il prodotto immediatamente dopo l'esecuzione ed è possibile selezionare una sottoarea da scansionare a definizione maggiore. Il programma consente di esportare i file in formati XYZ, IGES, DXF e VRML per utilizzare i dati su software diversi. Il programma consente inoltre di allineare le scansioni, generare le mesh e applicare texture fotografiche. È dunque possibile accedere a dati di scansione aggiuntivi senza dover caricare i punti di scansione in memoria. Per visualizzare o elaborare i punti di una scansione, questi devono essere prima salvati nella memoria. Nel manuale, l'espressione "caricare una scansione" si riferisce in realtà alla procedura per caricare i punti di una scansione. Una scansione può avere uno di due stati: caricata o non caricata, ma non può mai essere caricata solo in parte. A causa dei requisiti di memoria, è consigliabile non caricare simultaneamente molte scansioni complesse. Per elaborare le scansioni a piena risoluzione, selezionare i punti di scansione necessari e caricare solo tali punti. I punti di una scansione non più necessari possono essere rimossi dalla memoria. Se non è necessario utilizzare la piena risoluzione, è possibile caricare le scansioni a risoluzione ridotta.

Esistono tre tipi di vista per una scansione e differenti modalità di navigazione nella scena tridimensionale.

Vista rapida la scansione non deve essere caricata, ma questa vista non consente la misurazione. Se la vista rapida è attiva, la scansione selezionata nella vista Struttura si visualizza automaticamente.

Vista piana la vista standard di una scansione. La scansione deve essere caricata e, se necessario, ciò avviene automaticamente.

Vista 3D la vista 3D viene utilizzata esattamente come le altre viste. Inoltre, nella vista 3D è possibile collocarsi in posizioni arbitrarie nello spazio e osservare i punti di scansione ed i modelli CAD. Il mouse viene utilizzato per definire i movimenti di rotazione che si desidera eseguire e con la tastiera si definisce l'effettivo spostamento nello spazio. Se è stata selezionata la navigazione basata sull'osservatore, le frecce Sinistra, Destra, Su, Giù spostano l'utente nelle rispettive direzioni. Se è stata selezionata la navigazione basata sull'oggetto, le frecce definiscono il modo in cui l'oggetto si sposta, mentre l'osservatore appare fermo. E' ideale per visualizzare scansioni e oggetti contemporaneamente. Se la scansione non è caricata, sono visualizzati solo gli oggetti.

Navigazione in una vista

Nelle viste, l'utente assume il ruolo di osservatore dell'ambiente e guarda in una direzione particolare per esaminare l'area scansionata in una scala a sua scelta. In funzione del tipo di vista, la scelta di posizione può essere limitata; nella vista rapida e nella vista piana, può assumere solo la posizione dello scanner, ossia non può muoversi liberamente all'interno del locale. Quando si apre la vista di una scansione, inizialmente l'osservatore si trova nella posizione dello scanner che l'ha acquisita.

Navigazione basata sull'osservatore

Durante la navigazione, l'osservatore stesso si sposta all'interno dell'oggetto. Ad esempio, ruotando il mouse a destra, l'osservatore svolta a destra e gli oggetti dal margine destro della vista si portano al centro.

Navigazione basata sull'oggetto

Durante la navigazione sono gli oggetti a spostarsi, mentre l'osservatore rimane fermo. Ad esempio, ruotando il mouse a destra, l'intera area circostante l'osservatore sembra girare a destra e gli oggetti dal centro della vista si portano al margine destro.

Se la scansione contiene diverse aree d'interesse che l'utente desidera utilizzare ad alternanza, si può aprire diverse viste della stessa scansione e impostare visuale e scala per le aree d'interesse. È anche possibile utilizzare una sola vista, impostare visuale e scala su un'area d'interesse e salvare questa configurazione.

Impostazioni di visibilità

Le viste mostrano anche oggetti diversi dai punti di scansione, ad esempio:

- ✓ Le posizioni di altre scansioni nel workspace.
- ✓ Gli oggetti semplici assegnati ad una scansione creati dall'ottimizzazione, ad esempio sfere, punti 3D, ecc.
- ✓ Modelli CAD.

L'utente può decidere se visualizzare gli oggetti mediante le impostazioni di visibilità, distinte su tre livelli:

- ✓ Visibilità del layer cui è stato assegnato un oggetto.
- ✓ Visibilità secondo la prominente dell'oggetto.
- ✓ Distanza dell'oggetto dall'osservatore.

Un oggetto è visibile solamente se è impostata la visibilità dei primi due livelli e se è situato entro il campo impostato. Le impostazioni di visibilità

sono distinte per ogni vista ed è quindi impossibile ad un oggetto di essere visibile in una vista e non in un'altra.

3.5 PRETRATTAMENTO E FILTRAGGIO

In FARO SCENE è possibile applicare al caricamento di ogni scansione una serie di filtri predefiniti. I filtri sono operatori di convoluzione che agiscono su finestre di pixel (3x3 oppure 5x5) centrate su ogni punto della scansione. In un operatore di convoluzione, il valore di riflettanza di ogni punto viene sostituito con il risultato di una o più operazioni aritmetiche, eseguite sull'elemento stesso e su quelli del suo contorno.

I filtri disponibili nel programma sono i seguenti:

Fuori campo: il filtro “Fuori campo” è utile per correggere valori molto imprecisi, tipici delle misurazioni attraverso una finestra. Non bisogna applicare un filtro di questo tipo vicino ai bordi perché rimuoverebbe i punti lungo il bordo dato che la loro deviazione dal valore medio dell'area circostante è elevata. Si può indicare la dimensione dell'area circostante, utilizzata per il confronto, ed è inoltre possibile indicare un valore limite di deviazione standard, tale che se i punti hanno deviazione standard maggiore verranno eliminati.

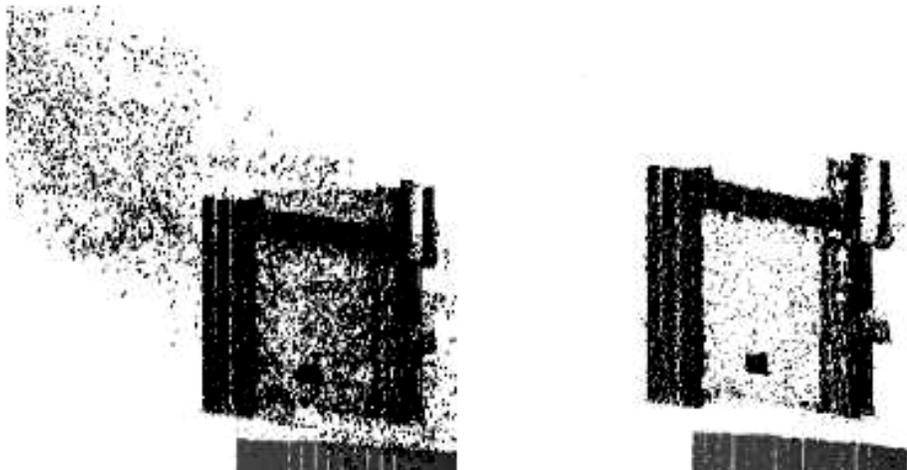


Figura 10 Applicazione del filtro fuori campo

Dispersione: si applica negli stessi casi del filtro “Fuori campo” ma ha prestazioni migliori con i bordi. Il filtro “di dispersione” è anche adatto per correggere misurazioni imprecise. È inoltre l'ideale per l'applicazione vicino ai bordi, se la percentuale richiesta ricade al di sotto del 50%. Si consiglia di non utilizzare il filtro su superfici con forte inclinazione verso il laser dello scanner.



Figura 11 Applicazione del filtro dispersione

Punto di scansione scuro: Consente di rimuovere punti di scansione con un rumore eccessivo. Questo filtro per punti di scansione scuri si basa su un criterio molto semplice: la selezione è determinata dal valore di riflettanza dei punti. *Soglia di riflettanza* indica il valore minimo di un punto di scansione per essere considerato. Questo criterio è utile perché con un punto di scansione scuro la quantità di luce assorbita dallo scanner è minima e pertanto la misurazione produrrà maggiore rumore. Questo filtro non può essere applicato a punti di scansione a colori.

Basato su distanza: consente di rimuovere punti di scansione entro una data distanza dallo scanner.

Leviga: consente di ridurre al minimo il rumore sulle superfici. Questo filtro sostituisce il valore misurato del punto di scansione con il valore medio dell'area circostante. Si può indicare la dimensione dell'area

circostante, utilizzata per il confronto, ed è inoltre possibile indicare un valore limite di deviazione standard, se la distanza tra il punto di scansione centrale e un punto di scansione nell'area circostante supera la soglia; tale punto non sarà utilizzato per il calcolo della media. Il filtro "Leviga" non rimuove mai i punti di scansione, ma ne altera le rispettive posizioni. Questo filtro è ideale per ridurre il rumore delle scansioni. Si consiglia di non applicare il filtro ai bordi o ad oggetti con molti particolari perché dato l'effetto di levigatura alcune caratteristiche dell'oggetto saranno attenuate fino a confondersi con i punti circostanti.

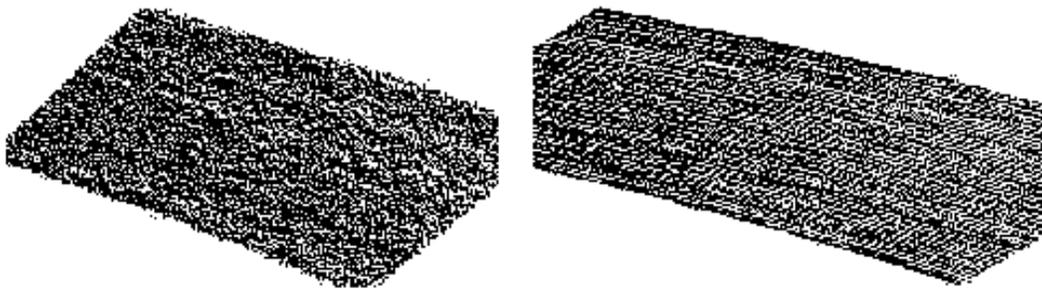


Figura 12 Applicazione del filtro leviga

La pulizia del dato primario (data cleaning) è un'operazione necessaria, dato che alcune situazioni verificabili abbastanza di frequente possono causare la memorizzazione di dati errati.

Le cause che generano gli errori citati in precedenza possono essere: la parziale riflessione del raggio in corrispondenza degli spigoli, gli errori nel calcolo della distanza dovuti alla presenza di materiali dotati di diversa riflettività, i punti errati causati da oggetti molto brillanti e gli effetti atmosferici. A questi errori, vanno aggiunti i punti causati dalla riflessione

di oggetti sullo sfondo, le riflessioni originatesi nello spazio tra scanner e oggetto (alberi od oggetti in primo piano, persone che si muovono o traffico) e le riflessioni multiple del raggio laser.

La maggior parte di questi punti errati può essere eliminata solo mediante procedimenti iterativi, poiché non esiste un metodo automatico che preveda tutte queste possibilità di errore; alcuni software assistono l'operatore in questo processo di editing tramite procedure semi – automatiche. Per esempio i punti sullo sfondo possono essere facilmente eliminati mediante l'introduzione di un intervallo di distanza, che consente contemporaneamente di eliminare le riflessioni multiple. Molto più difficili da eliminare sono i punti errati sugli spigoli. (Per approfondimenti Manuale Faro Scene)

Le operazioni che caratterizzano il processo produttivo di un rilievo mediante laser a scansione sono strutturate nel seguente modo:

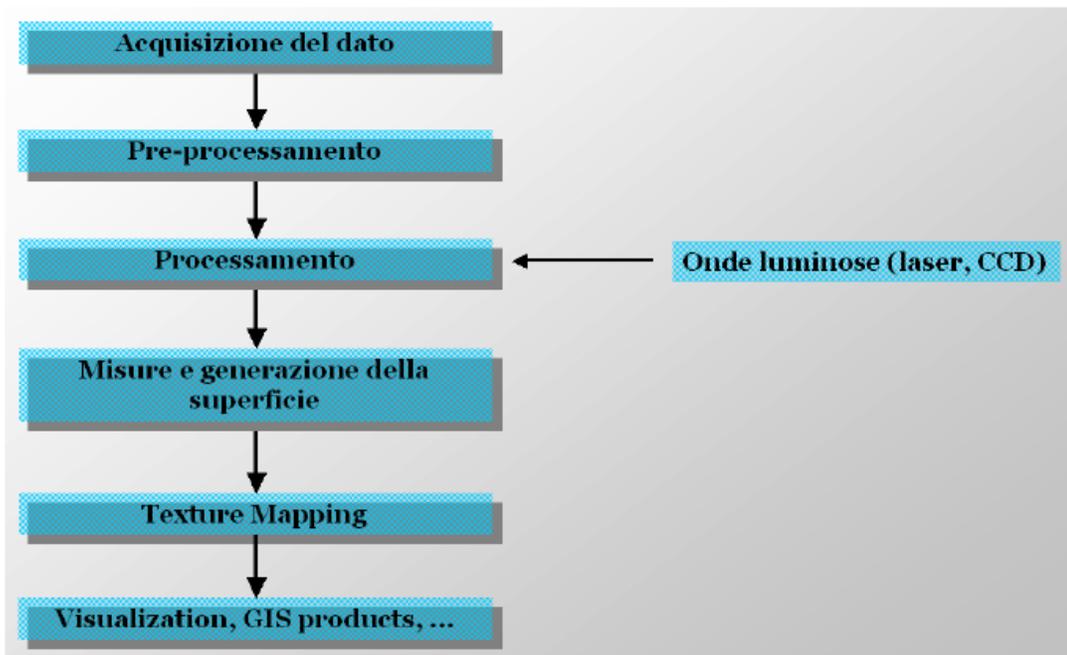


Figura 13 Diagramma di flusso della modellazione 3D

CAPITOLO IV

PROCESSAMENTO DEI DATI E GENERAZIONE DEI PRODOTTI FINALI

Il processamento dei dati consiste nell'elaborazione dei dati acquisiti in sede di rilievo e pre-trattati, nel caso in studio, utilizzando il programma Faro Scene. Nella fase di pretrattamento e filtraggio sono state compiute le operazioni di: **visualizzazione, generazione delle nuvole, pretrattamento, filtraggio e pulizia dei dati grezzi.**

La fase successiva, il processamento dei dati, è stata svolta con l'ausilio del programma **Rapidform**, prodotto dall'Inus Technology.

Data la grandissima mole di dati, e considerando le dotazioni hardware e software, si è reso necessario scomporre il dataset della sala nelle pareti principali; a queste motivazioni si è aggiunta una ulteriore problematica che verrà descritta nel seguito.

I dati in formato .XYZ (rinominati per il programma in .ASC) sono stati quindi segmentati e scomposti: da una scansione complessiva se ne sono ricavate cinque raffiguranti le pareti escluso il soffitto. L'operazione di segmentazione è stata eseguita poiché le nuvole visualizzate su Faro Scene, e successivamente esportate, venivano rappresentate come una sala rettangolare chiusa. Le nuvole di punti venivano solo visualizzate dall'esterno e non era possibile nessuna variazione del punto di vista per consentire un ingresso nella sala.

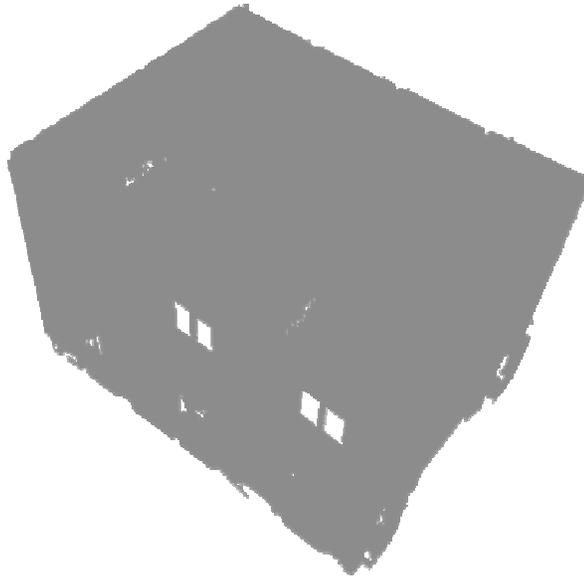


Figura 1: Nuvola importata in formato .ASC

Da questo punto di vista esterno non era possibile una valutazione di come venisse eseguita la mesh e non si potevano correggere eventuali errori.

Per ovviare a questo problema il rilievo è stato scomposto nelle pareti principali e sono state generate le mesh separatamente. La scomposizione nelle pareti principali ha richiesto particolare attenzione all'orientamento: se i prodotti generati successivamente dovevano raffigurare la stanza intera, i sistemi di riferimento dovevano infatti rimanere inalterati.

I dati dei quali si dispone sono quindi: cinque scansioni della sala scomposte nelle cinque pareti principali (viene escluso il pavimento perché molte parti non risultavano visibili) e due scansioni di particolari del soffitto a cassettoni.

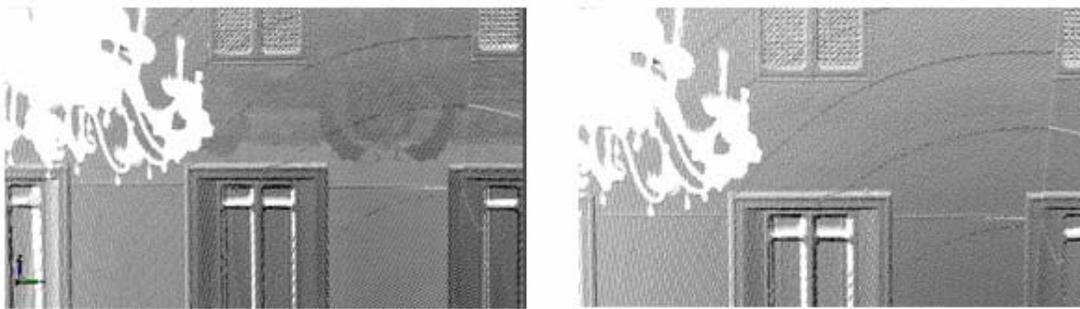


Figura 1: Paragone tra una nuvola di punti con valori di riflettanza (a sinistra) e senza riflettanza (a destra)

Le moli di dati raccolte dal laser scanner Faro sono enormi, per una parete si possono raggiungere i nove milioni di punti. I dati raccolti non potevano essere trattati nella loro interezza, le risorse hardware e software hanno reso necessario uno sfoltimento dei dati utilizzando un filtro ridondanza, che consente di eliminare le informazioni rindondanti diminuendo la quantità di dati. Facendo tesoro delle esperienze precedenti di texture mapping, il combinare riflettanza (derivante dalla scansione) e colore RGB (derivante dalla fotografia) comporta numerosi problemi e singolarità nell'accoppiamento e quindi il valore di riflettanza è stato eliminato.

Per trovare il metodo che portasse ai migliori prodotti finali si è operato secondo diverse strategie operative che combinassero in maniera diversa le fasi di **allineamento**, **generazione della mesh** e **correzione di singolarità**.

Gli esiti sperati sono stati ottenuti seguendo il seguente procedimento: sono state, per prima cosa, generate in automatico delle mesh triangolari. In seguito a vari tentativi, le mesh migliori sono state ottenute modificando l'angolo tra le facce dei triangoli da 65° a 90° . Successivamente le superfici create sono state corrette singolarmente e allineate tutte insieme. Infine le singole pareti, nelle quali era stata scomposta la sala, sono state

4.1 GENERAZIONE DELLE SUPERFICI

L'operazione di modellazione vera e propria avviene con la trasformazione della nuvola di punti in una superficie continua, il modello 2.5D o realmente 3D, tramite la generazione delle mesh; nel caso di oggetti dotati di una geometria semplice, l'ottenimento del modello è un'operazione quasi automatica, ma nel caso di oggetti complessi caratterizzati da molte discontinuità (per esempio colonne, statue, nicchie...), ottenere un modello corretto richiede tempi di elaborazione più lunghi ed un notevole intervento da parte dell'operatore.

Per gli oggetti complessi, solitamente è necessario suddividere la nuvola di punti in porzioni appartenenti ad entità uniformi tramite la fase cosiddetta di segmentazione; ciascuna entità viene quindi modellata separatamente, mentre il modello complessivo è generato dall'unione delle singole entità modellate.

Solitamente i software in commercio consentono di effettuare l'operazione di segmentazione esclusivamente in modo manuale: l'operatore sceglie e seleziona una porzione della nuvola di punti dallo schermo e lancia il tool di modellazione. Questa procedura richiede uno sforzo notevole da parte dell'operatore per identificare le porzioni di punti, soprattutto nel caso in cui il modello sia molto denso di informazioni e complesso nella forma. Attualmente si nota tuttavia un crescente impegno, nell'ambito della ricerca, per lo sviluppo di tecniche automatiche di segmentazione, che traggono origine dalle tecniche utilizzate per il trattamento dei dati ottenuti da laser scanner aerei.

Creato il modello, è quindi possibile ricavare da esso i prodotti finali ottenibili.

Bisogna sottolineare che, considerata l'enorme quantità di dati ottenibili mediante un rilievo laser scanner, una rappresentazione dell'oggetto con strumenti classici, come prospetti in ambiente CAD, è del tutto inappropriata e produce una perdita significativa di dati.

Per questo motivo la migliore rappresentazione che si può ottenere è mediante un modello tridimensionale che consenta di esplorare l'oggetto e da cui siano facilmente ricavabili misure e sezioni (normalmente i software in commercio consentono l'estrazione automatica di sezioni).

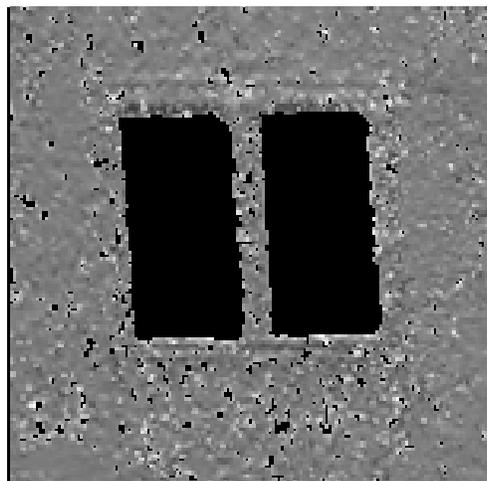
Il modello 3D, magari foto – texturizzato e navigabile dell'oggetto, è un prodotto facilmente ottenibile, ma può essere di difficile gestione per l'utilizzatore inesperto e richiede un supporto hardware piuttosto potente (scheda grafica dotata di acceleratore tridimensionale e processore adeguato). Il risultato è però di grande impatto sull'osservatore e fornisce una descrizione dell'oggetto molto dettagliata, da cui è possibile ottenere informazioni metriche accurate.

Un altro prodotto metrico molto utile per analizzare in modo approfondito l'oggetto è l'ortofoto, ottenibile tramite integrazione fra le immagini dell'oggetto acquisite contestualmente o non al rilievo laser (Conforti Andreoli et. al, 2003; Bitelli, 2002)

Le superfici generate in automatico presentano notevoli *buchi* e singolarità che devono essere modificate manualmente o lanciando alcuni tool, per esempio quelli di riempimento automatico.

Di seguito si illustra l'applicazione di alcune di queste procedure.

Esempio dell'utilizzo del tool di riempimento automatico:



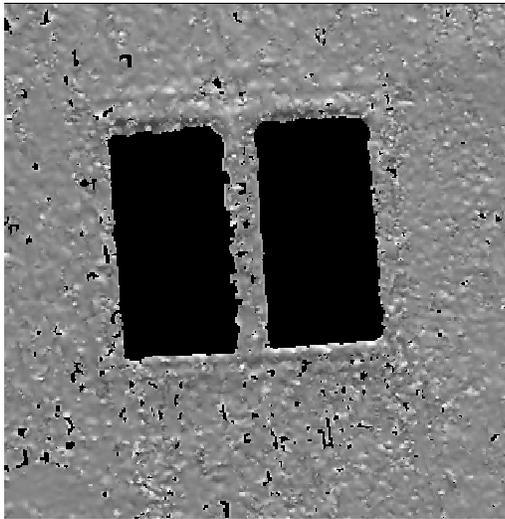
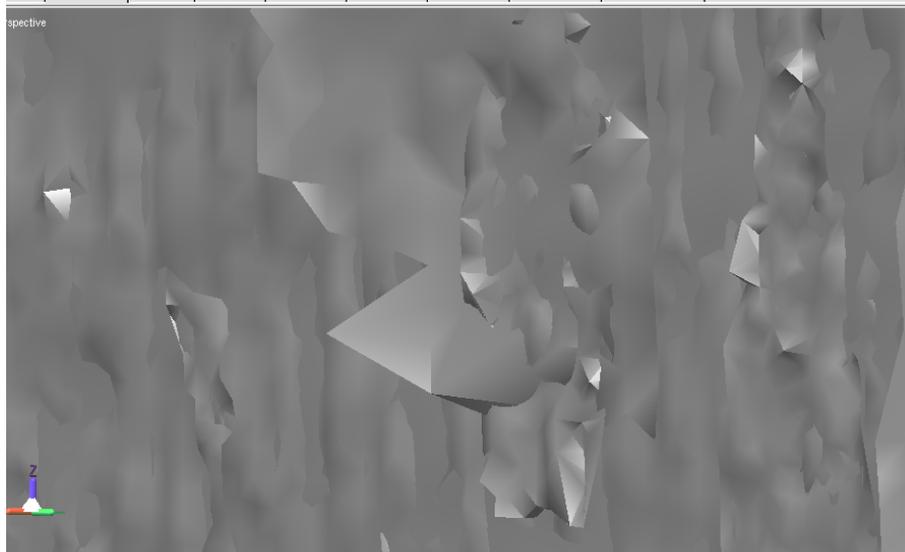


Figura 1: Utilizzo tool fill holes di riempimento automatico

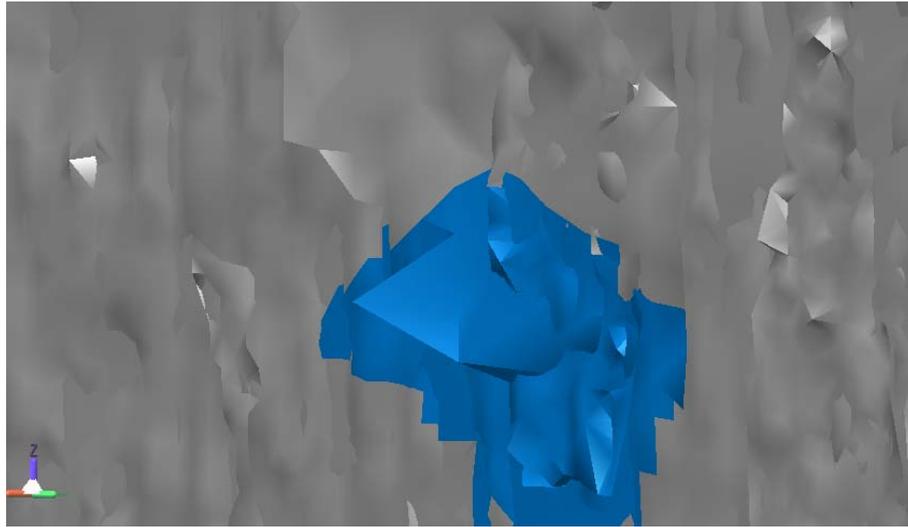
Operazioni per l'eliminazione di singolarità:

- ✓ Individuazione del particolare



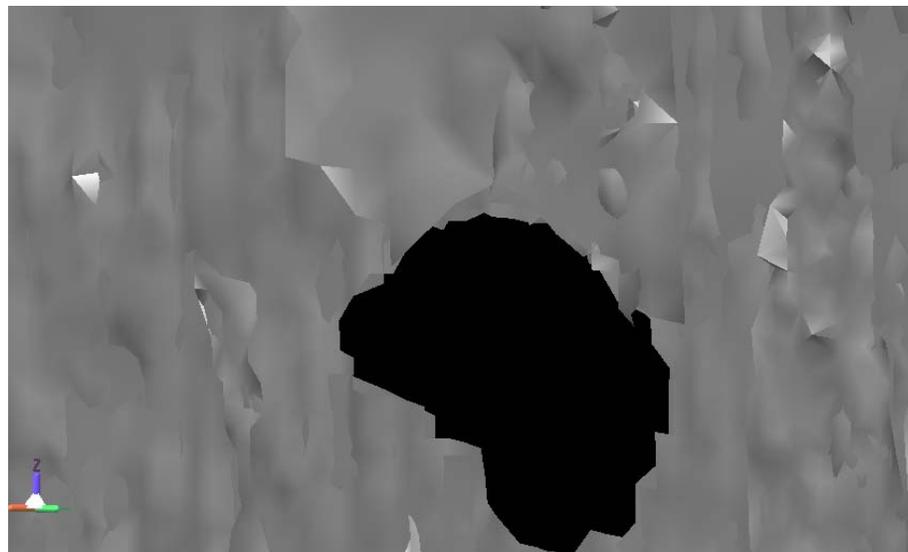
a

- ✓ Selezione dell'area interessata



b

- ✓ Eliminazione di facce della mesh che si appoggiano su punti errati



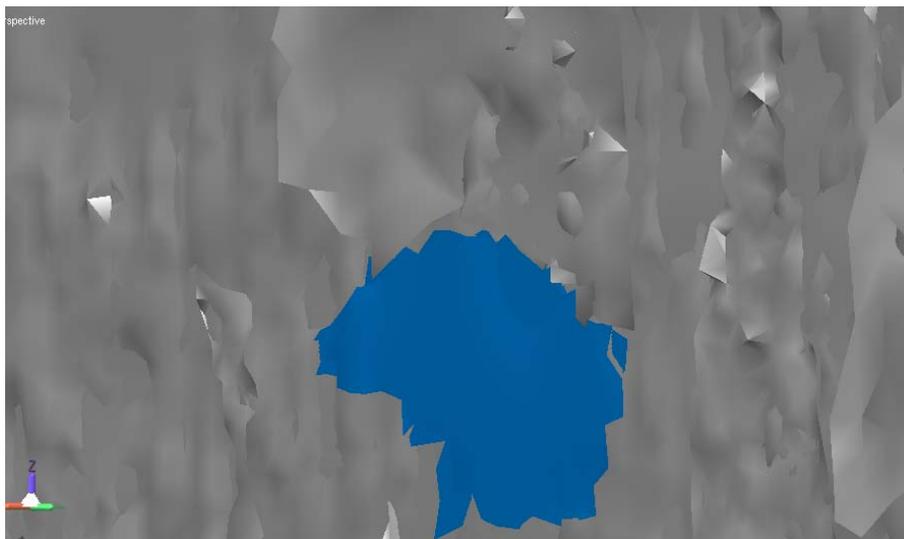
c

- ✓ Selezione dell'area da riempire



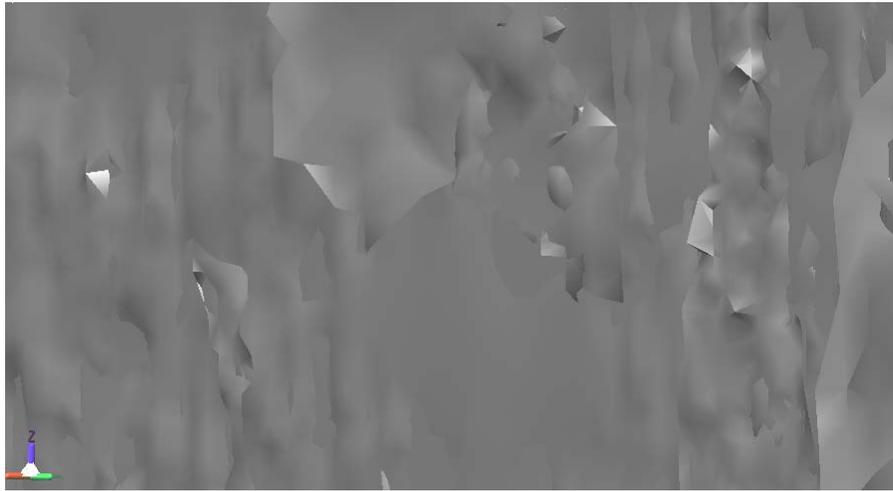
d

- ✓ Riempimento utilizzando il comando Fill Holes



e

- ✓ Rimozione della singolarità



f

Figura 2: Passi operativi per la rimozione di una singolarità (a,b,c,d,e,f)

Le nuvole di punti, sulle quali sono state generate le mesh, sono state allineate insieme ottenendo così una singola nuvola per ogni parete principale. I dati ottenuti dal laser necessitano di molto lavoro di post-processing e non sono così perfetti già dopo l'acquisizione. Alcuni programmi creati per la visualizzazione, ingrandendo il punto e generando al suo posto un pixel, rendono il dato successivo all'acquisizione già utilizzabile. Il problema principale si riscontra quando, lavorando con nuvole molto grandi, anche nove milioni di punti, i programmi faticano a lavorare: è necessario quindi un alleggerimento delle informazioni attraverso filtri, per esempio filtri rindondanza. Il problema della dimensione delle nuvole è dovuto principalmente al fatto che, allo stato dell'arte, i programmi sono sviluppati per piccoli particolari e, anche se la risoluzione utilizzata è molto elevata, le nuvole di punti da gestire sono di gran lunga inferiori a quelle utilizzate in questa lavoro. Le applicazioni su scala più vasta (per esempio stanze o facciate di edifici) necessitano di studi

ancora più specialistici per riuscire a integrare in modo completo la fase di visualizzazione con quella di generazione delle mesh.

4.1 ALLINEAMENTO DELLE NUVOLE

Gli oggetti del rilievo devono essere completamente visibili dalla postazione scelta per posizionare lo strumento e per rilievi molto estesi possono essere necessarie più scansioni. Ogni scansione realizzata viene eseguita con un punto di presa diverso e, di conseguenza, un diverso sistema di riferimento cartesiano locale. I vari sistemi di riferimento sono centrati nello strumento e arbitrariamente orientati, ne deriva che le varie nubi di punti relative allo stesso oggetto siano indipendenti, senza alcun legame geometrico noto a priori.

La registrazione è l'insieme di tutte le operazioni necessarie a definire dei parametri di rotazione e traslazione che consentano di riferire le varie nubi a un unico sistema di riferimento.

Nelle scansioni sono presenti diversi sistemi di riferimento che possono essere descritti come segue:

Sistema di riferimento intrinseco

Uno strumento laser a scansione rileva le coordinate di un punto utilizzando due angoli e la distanza. Lo strumento, essendo posizionato come un teodolite sulla basetta, teoricamente (trascurando gli errori costruttivi) dovrebbe avere i due assi, che consentono la misurazione degli angoli, passanti per il centro strumentale. Per ovviare al problema relativo agli errori costruttivi, si effettua un passaggio di coordinate nel sistema intrinseco. Questo sistema di riferimento ha un significato puramente convenzionale e rimane fisso per ogni strumento. Il modello geometrico utilizzato o è contenuto nella documentazione tecnica allegata oppure è visionabile mediante il programma che accompagna lo strumento.

Sistema riferimento oggetto

Il sistema di riferimento oggetto è solitamente materializzato mediante una serie di GCP (Ground Control Points) aventi coordinate note, oppure utilizzando una scansione come riferimento per le altre. La trasformazione dal Sistema di riferimento intrinseco di una data scansione nel Sistema di riferimento oggetto è realizzata mediante una roto-traslazione rigida nello spazio, i cui parametri possono essere calcolati sulla base di punti di controllo noti in entrambi i sistemi (Beinat et. al, 2006).

4.1.1 ALLINEAMENTO INDIRETTO

Il metodo più comunemente utilizzato per la registrazione delle scansioni è quello basato sull'impiego di un numero sufficiente di GCP per il calcolo dei parametri della trasformazione. Tale metodo è chiamato con il termine di allineamento indiretto. Il metodo è basato sulla registrazione all'interno del Sistema di riferimento oggetto di ciascuna scansione; è molto simile al calcolo dell'orientamento assoluto di un modello fotogrammetrico, salvo il fatto che il fattore di scala è fisso e che i valori iniziali dei parametri incogniti non assumono valori scontati come nel caso dei blocchi aerei. Come è ben noto, il calcolo di una roto-traslazione 3D non è un problema lineare. Esiste una seconda soluzione che prevede un approccio analogo a quello utilizzato in triangolazione fotogrammetrica, per cui all'interno del blocco di scansioni vengono misurati sia punti di legame che GCP; grazie a queste osservazioni è possibile procedere al calcolo simultaneo ai minimi quadrati di tutti i parametri incogniti e delle loro precisioni.

4.1.2 ALLINEAMENTO DIRETTO

E' possibile anche affrontare il problema della registrazione delle scansioni utilizzando un approccio di tipo diverso, non più basato sull'orientamento delle nuvole di punti acquisiti, ma su quello del sensore stesso. In questo caso un laser a scansione viene orientato in modo analogo a quanto fatto

normalmente con una stazione totale: l'asse primario viene centrato su un punto a terra e viene rettificato mediante l'impiego di viti calanti e di una livella torica solidale allo strumento; infine il restante grado di libertà, costituito dalla rotazione nel piano orizzontale (azimutale), viene vincolato mediante l'individuazione di una direzione nota. Quest'ultima procedura è tecnicamente realizzata con una tra le due seguenti modalità:

- ✓ utilizzando un cannocchiale topografico installato sopra lo strumento, la cui direzione di collimazione è nota per costruzione nel sistema di riferimento intrinseco.
- ✓ utilizzando la collimazione di un target di orientamento; in alcuni strumenti questa procedura può essere eseguita direttamente durante l'acquisizione, altrimenti deve essere rinviata alla fase di elaborazione dei dati in laboratorio.

Ovviamente l'impiego dell'allineamento diretto può risultare molto conveniente da un punto di vista operativo in tutti quei casi in cui il posizionamento dei target da utilizzare come GCP è complesso o costoso, oppure in applicazioni di tipo speditivo nelle quali la precisione dei punti acquisiti non è l'elemento prioritario. Si pensi ad esempio al rilevamento di ambienti interni, di gallerie, di miniere, nei quali può essere richiesto un numero elevato di acquisizioni con laser a scansione e quindi un notevole dispiego di target. Lo svantaggio di questa modalità operativa, considerando la strumentazione attuale, è costituito dalla minore precisione ottenibile nelle coordinate delle nuvole di punti acquisite (Alba et al., 2005; Beinart, 2004)

In passato, soprattutto nell'area della Computer Vision, notevoli sforzi sono stati fatti riguardo la tematica della registrazione di nuvole tridimensionali di punti. Uno dei metodi più popolari, tuttora implementato nella maggior parte dei software commerciali che si occupano della gestione ed

elaborazione di dati 3D, è l'algoritmo *Iterative Closest Point* (ICP), sviluppato da Besl e McKay, che sono considerati i pionieri della registrazione, in quanto sono riusciti a tradurre in modo formale l'allineamento di superfici (Besl & McKay, 1992); il principio di funzionamento del primo algoritmo è stato poi variato e sviluppato, anche da numerosi altri autori, nel corso degli anni.

L'algoritmo ICP applica in modo iterativo una roto-traslazione rigida nello spazio ad una delle due nuvole, considerata mobile, affinché si sovrapponga nel miglior modo possibile all'altra nuvola, considerata fissa.

Il metodo è un cosiddetto punto-punto, che si contrappone al metodo punto-piano sviluppato da Chen e Medioni (Chen & Medioni, 1992). In entrambi i metodi adottati, la registrazione avviene tramite la ricerca del minimo di una funzione obiettivo.

Nel primo metodo (metodo punto-punto) questa funzione è data dalla somma dei quadrati delle distanze dei punti corrispondenti delle nuvole. I punti corrispondenti si definiscono come la coppia formata da un punto di una nuvola e quello più vicino appartenente alla nuvola opposta. Nel secondo metodo (punto-piano), pur rimanendo la stessa struttura della funzione obiettivo, sono da minimizzare però le distanze tra i punti di una nuvola ed i piani di *best-fit* passanti per i punti dell'altra.

L'algoritmo procede in questo modo (Figura 45): date due superfici P e Q da allineare, si considera un punto di P indicato con p, e si cerca un punto particolare di Q, detto punto corrispondente q, che coincide con il punto più vicino (punto a distanza minima); in pratica per ogni punto della nuvola mobile vengono ricercati, all'interno della nuvola fissa, i punti contenuti all'interno di una sfera di un certo raggio (multiplo di un parametro introdotto dall'utente) e di questi viene tenuto il più vicino, che sarà considerato il punto corrispondente.

Questo avviene formalmente definendo un operatore "punto più vicino" (*Closest Point Operator*) C, secondo la relazione:

$$C : P \rightarrow Q / \forall p \in P \exists q : \min(\overline{pq}) < \varepsilon$$

Fatto questo per tutti i punti della nuvola mobile e sommati i quadrati delle distanze relative, si ottiene il valore che sarà poi quello da minimizzare muovendo con delle rototraslazioni rigide la nuvola che si è scelta mobile.

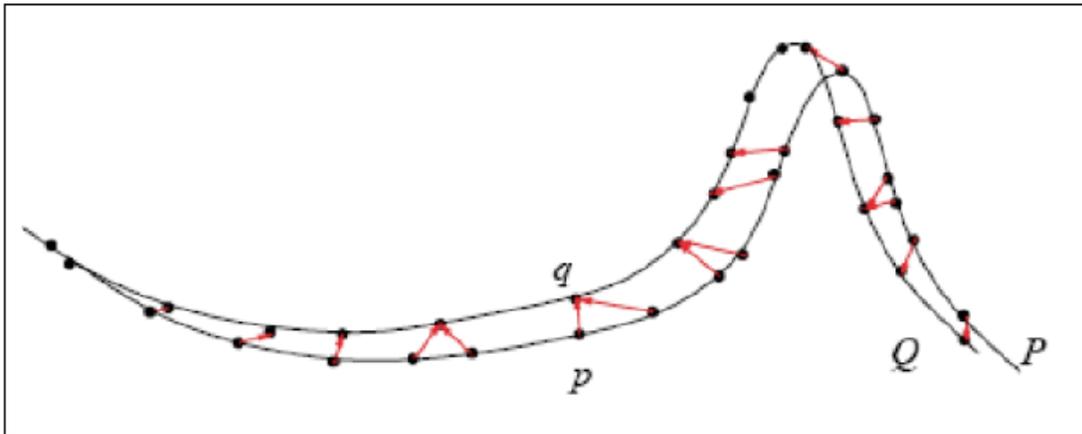


Figura 3 Metodo punto-punto

Si nota come in una procedura di ricerca così fatta, vengano escluse automaticamente tutte le coppie di punti corrispondenti che risultano avere una distanza superiore al valore del raggio della sfera da noi definita. Questo valore deriva da un parametro inserito dall'operatore, dal quale dipenderà anche l'esito della registrazione. Tale parametro in letteratura è convenzionalmente stimato come il doppio della distanza media dei punti di una nuvola, tuttavia in caso di forti disallineamenti dovrà essere convenientemente aumentato.

Naturalmente dopo un primo tentativo di minimizzazione delle distanze dei punti corrispondenti, sarà molto improbabile che la registrazione sia andata a buon fine, infatti molte coppie di punti che si sono formate, risulteranno essere solo "fittizie" e non porteranno verso un vero allineamento.

Saranno necessarie quindi più iterazioni, all'interno delle quali ripetere le operazioni di ricerca dei punti corrispondenti e di minimizzazione delle distanze. La convergenza dell'intero processo si avrà quando la variazione

della matrice di rototraslazione tra due iterazioni successive è minore di una certa percentuale (generalmente quando la differenza delle ultime due traslazioni e rotazioni è contemporaneamente minore dell'1%).

Le coppie di punti corrispondenti che si sono formate sono quelle all'interno della zona di sovrapposizione e in questo modo sono automaticamente esclusi tutti quei punti delle nuvole che non devono prendere parte al processo (punti di rumore o più generalmente fuori dalla zona di sovrapposizione).

Dopo aver creato le coppie si procede alla minimizzazione della funzione:

$$e = \sum_{i=1}^N \left\| q_i - (R_{pi} + T) \right\|^2$$

con N numero di coppie corrispondenti che si sono formate, e R,T matrici di rotazione e traslazione.

Dopo aver trovato il minimo si ricomincia con un'altra iterazione calcolando i punti vicini. A questo punto però, viene ridotto di una certa percentuale il raggio σ della sfera con la quale si esegue la ricerca (il criterio di questa riduzione varia a seconda degli autori).

Nel metodo di registrazione con minimizzazione delle distanze con metodo punto-piano, ad ogni punto della nuvola mobile viene associato un certo numero di punti dell'altra nuvola ottenuti scegliendoli tra quelli più vicini alla normale uscente dal punto della nuvola mobile. Questi punti vengono utilizzati per fare un *best-fit*, ossia trovare un piano che li approssima (col metodo dei minimi quadrati). Ogni punto della nuvola mobile si troverà così associato ad un piano (indicato con π) sulla nuvola fissa; la funzione obiettivo in questo caso è minimizzare la somma dei quadrati delle distanze punto-piano di tutti i punti della nuvola mobile (figura 46) ossia trovare il minimo di:

$$e = \sum_{i=1}^N \left(\overline{R_{pi} + T, \pi_i} \right)^2$$

A parte il diverso modo di intendere la funzione obiettivo, la struttura dell'algoritmo rimane essenzialmente la stessa di quella del metodo punto-punto. Questo metodo permette una convergenza con un numero di iterazioni di un ordine di grandezza minore, grazie al fatto che possiamo muoverci su un piano (quindi su due dimensioni) per trovare il minimo della funzione.

Sebbene il processo di *best-fit* dei piani risulti piuttosto oneroso dal punto di vista computazionale, il metodo punto-piano resta più veloce e più preciso di quello punto-punto.

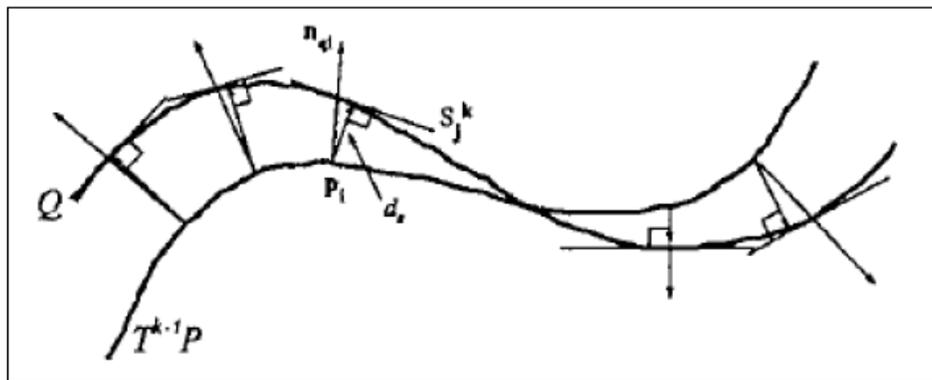


Figura 4 Metodo punto-piano

L'algoritmo ICP originale è *pairwise based*, cioè l'allineamento avviene per due sole nuvole per volta; i software commerciali (ad esempio PolyWorks, Innovmetric; Geomagic Studio, Geomagic Inc.; **Rapidform, INUS Technology**) permettono di eseguire, dopo una prima fase di allineamento delle nuvole a due a due in cui ogni nuvola viene allineata con l'ultima ottenuta, un allineamento globale di tutte le nuvole insieme, allo scopo di ridistribuire e quindi minimizzare l'errore residuo di registrazione fra tutte le scansioni.

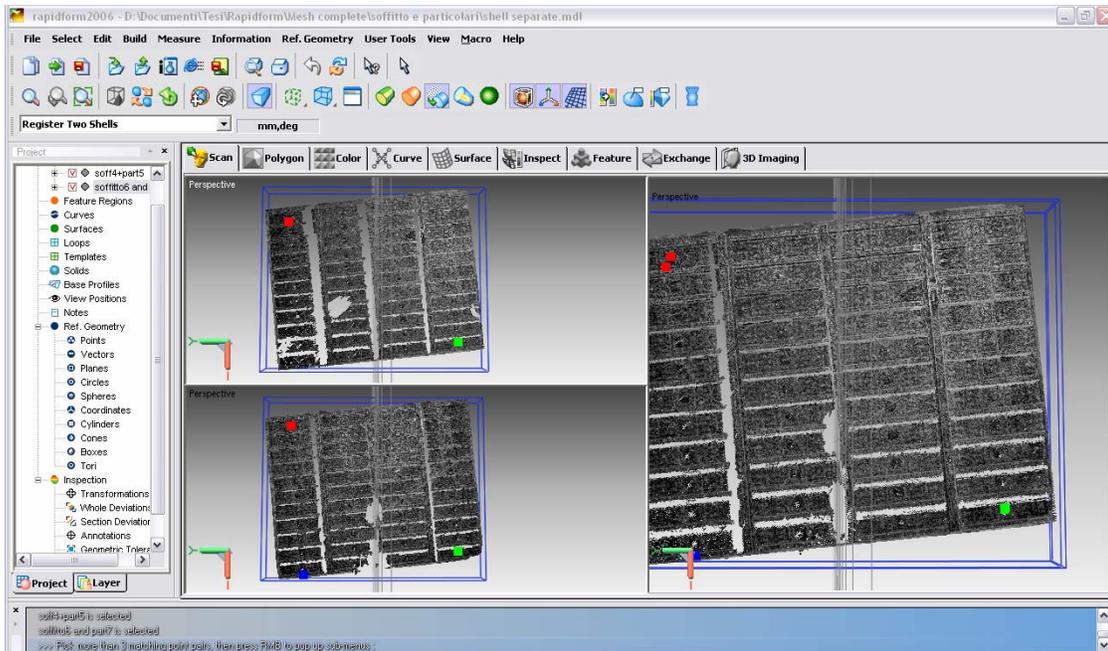


Figura 1: Procedura di allineamento eseguita con il software Rapidform

La procedura di allineamento avviene perchè le scansioni di una sola parete sono cinque e sono tutte in sistemi di riferimento diversi. Se importate in un unico file vengono orientate nello spazio secondo la figura seguente:

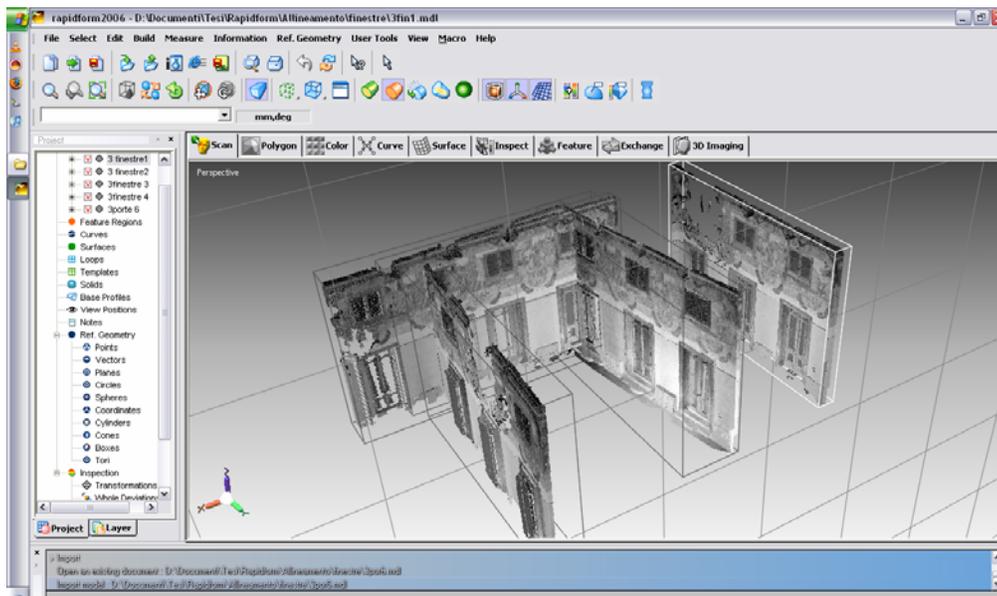


Figura 2: Orientamento delle mesh nello spazio prima dell'allineamento

La realizzazione della procedura di allineamento, anche se viene realizzata con la massima attenzione da parte dell'operatore, introduce errori che possono essere anche superiori alla precisione dello strumento, quindi degni di nota. Il comando utilizzato è *shell deviation*, fornisce la possibilità di visualizzare le aree a maggior concentrazione di errore sulla nuvola. Solitamente le aree a maggior concentrazione di errori sono le aree dei bordi, quindi per avere un monitoraggio più attendibile della parte centrale della scansione è consigliabile effettuare un controllo aggiuntivo ignorando i bordi delle nuvole. In automatico viene realizzato un grafico che rappresenta l'errore come variabile aleatoria (distribuita secondo una gaussiana normalizzata con varianza e valor medio).

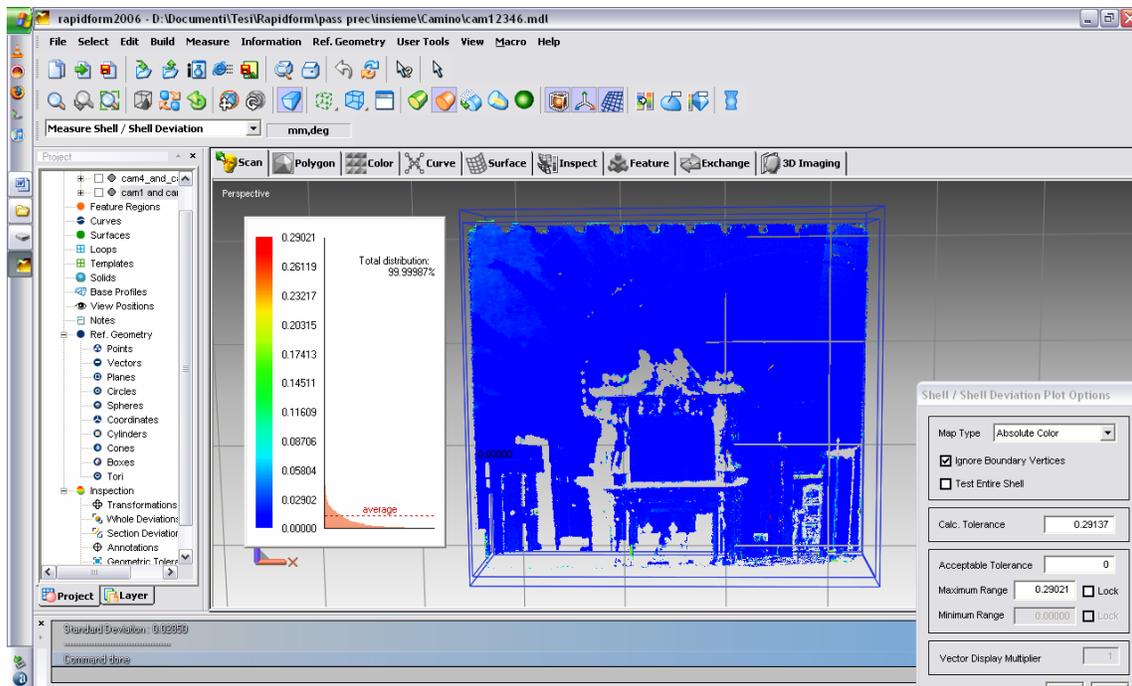
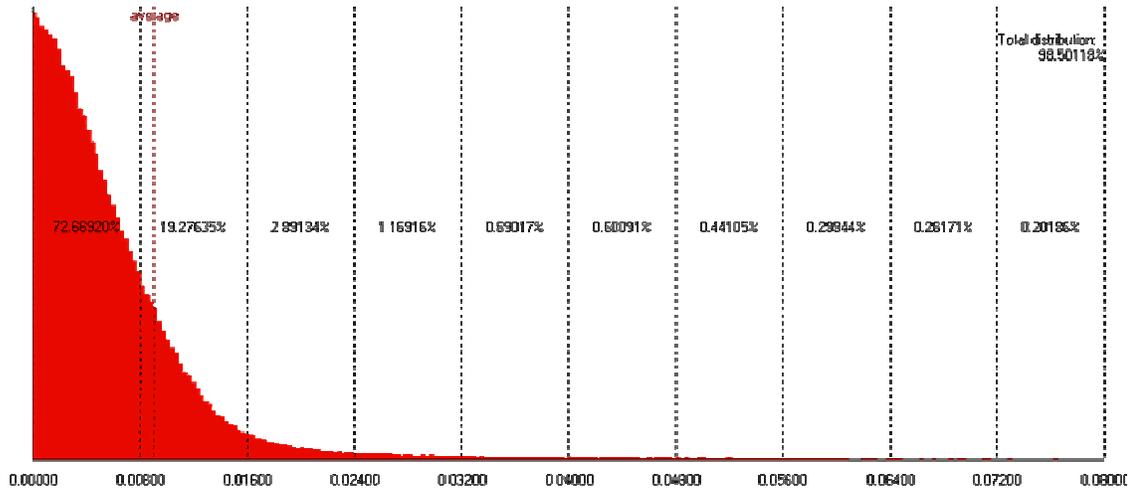


Figura 3: Visualizzazione della distribuzione dell'errore nella componente della profondità

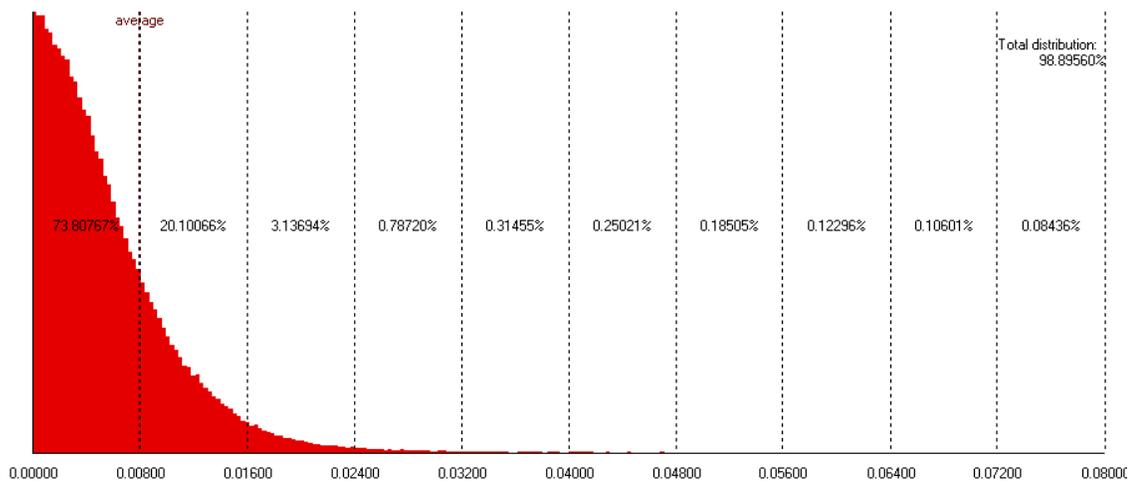
Il comando in questione valuta i residui tra la differenza delle due nuvole nella componente di profondità. Il comando consente di realizzare un controllo necessario per valutare come viene realizzata l'operazione di allineamento.

Vengono riportati in seguito i risultati ottenuti nell'allineamento delle quattro nuvole raffiguranti la stessa parete; i dati sono espressi in metri. I confronti sono stati fatti tra tutti gli allineamenti prendendo come riferimento la prima scansione.

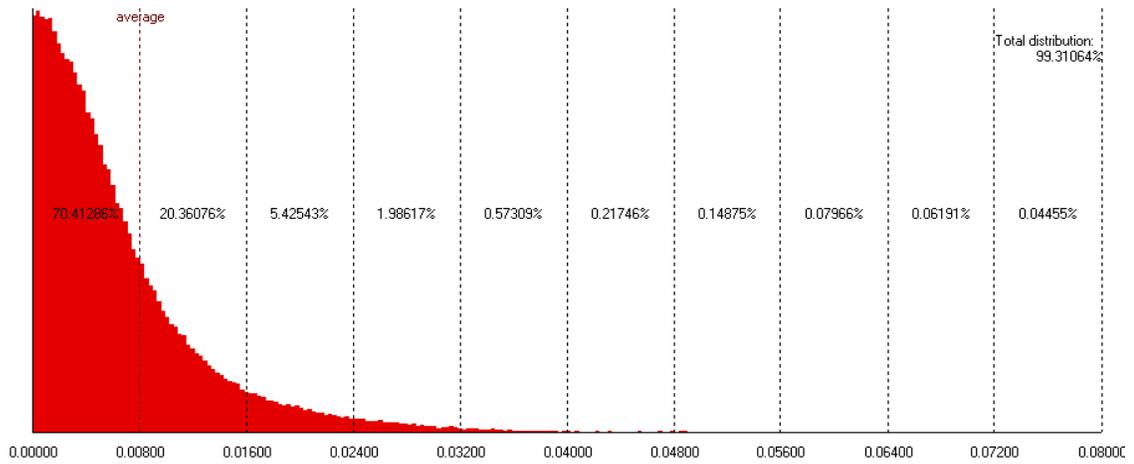
Prima nuvola con seconda nuvola



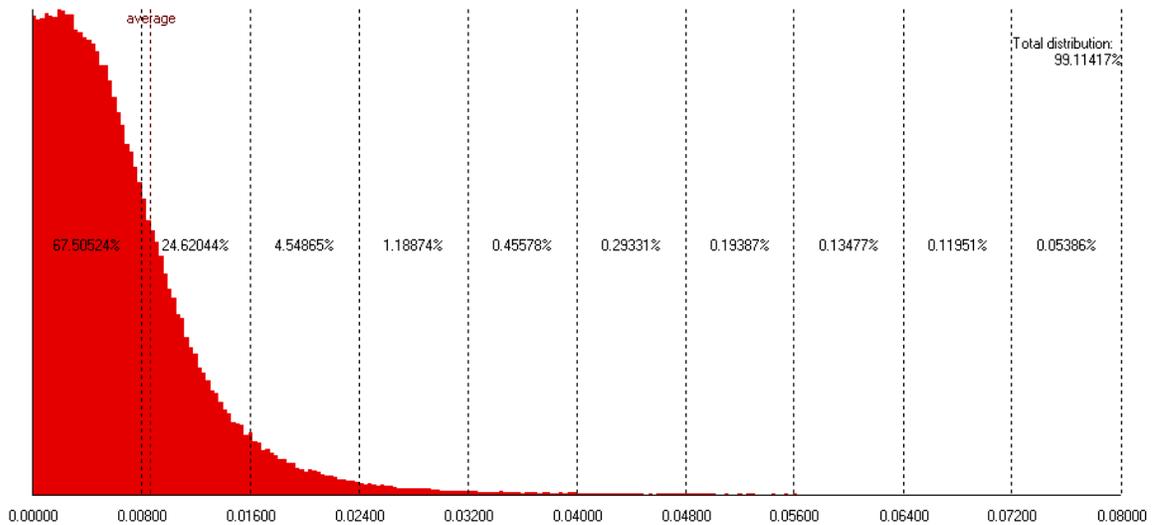
Prima nuvola con terza nuvola



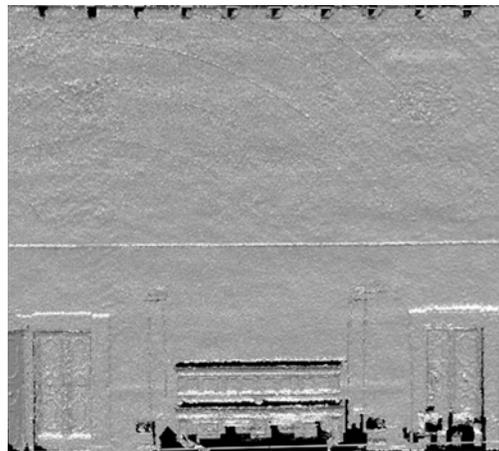
Prima nuvola con quarta nuvola



Prima nuvola con quinta nuvola



Dalle precedenti valutazioni emerge che il valor medio dell'errore è all'incirca di 8 mm, paragonandolo alla precisione strumentale concludere che l'allineamento è avvenuto con successo.



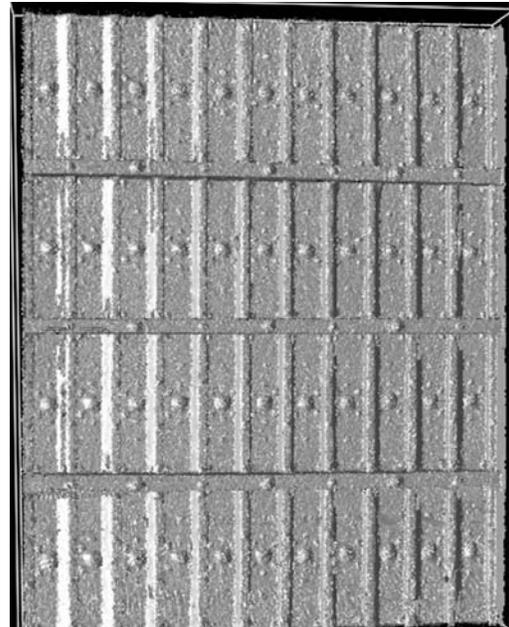
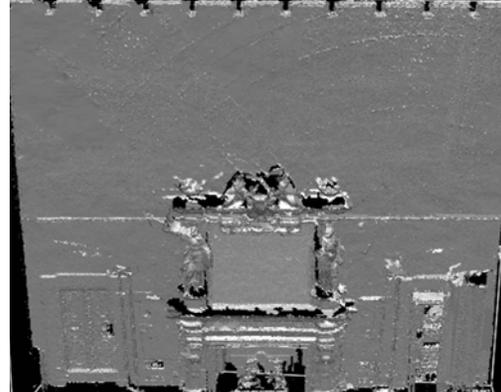


Figura 4: Confronto tra immagine fotografica e prodotto del laser a scansione

4.1 LASER SCANNER E FOTOGRAMMETRIA

In questo paragrafo si vogliono esporre considerazioni di carattere generale sull'accoppiamento dei due metodi di rilievo. Nella tesi le applicazioni eseguite in tal senso si limitano all'applicazione di una texture fotografica sul modello 3D, in termini pratici un'applicazione delle informazioni ricavabili dalla fotografia (colori RGB, materiali e stato di degrado) sul modello già realizzato dal laser.

Sino a pochi anni fa la tecnica principalmente utilizzata per il rilievo di Beni Culturali era la fotogrammetria, unita al rilievo topografico di appoggio per l'acquisizione dei punti di controllo; sicuramente con l'avvento dei primi laser a scansione terrestri effettivamente utilizzabili in questo ambito, l'enorme quantità di dati acquisiti unitamente all'incredibile velocità di acquisizione ottenuti mediante questa metodologia, ha fatto in un primo tempo pensare ad una possibile sostituzione delle due tecniche.

4.1.1 CONFRONTI TRA FOTOGRAMMETRIA E LASER A SCANSIONE

A titolo esemplificativo si riportano i risultati di una sperimentazione che si prefigge di cogliere i vantaggi di una metodologia di rilievo rispetto all'altra. Il rilievo è stato svolto nel 2003 dal Prof Guerra (IUAV Venezia) e ha come oggetto il paramento esterno di tre arcovoli dell'arena di Verona. Nel confrontare le due metodologie si sono analizzate le modalità operative in campagna e le operazioni di gestione e trattamento dei dati in laboratorio, sono state messe in evidenza le operazioni comuni alle due tecniche, quelle logicamente assimilabili e quelle completamente diverse.

Successivamente sono stati paragonati i due prodotti vector e raster, per valutare le differenze e cercare di individuare le cause. In ultima analisi sono stati paragonati i tempi necessari per realizzare il rilievo usando le due diverse tecniche e per evidenziare eventuali economie rese possibili dall'uso della metodologia laser.

Per il rilievo laser è stata utilizzato uno strumento LMS-Z360i con camera digitale Nikon D100.

FOTOGRAMMETRIA		LASER SCANNING	
Segnalizzazione	1 h	Segnalizzazione	30 min
Appoggio topografico	20 min	Appoggio topografico	10 min
Prese stereo per 6 modelli	1 h	Scansione laser (3 stazioni)	45 min
		Acquisizione immagini	15 min
Calcolo coordinate punti di appoggio e preparazione file	1 h	Calcolo coordinate punti di appoggio e preparazione file	1 h
		Selezione, filtraggio e decimazione	15 min
Orientamento di 6 modelli	3 h	Orientamento delle 3 nuvole nel sistema assoluto	10 min
Restituzione di 6 modello	30 h	Restituzione da orthofoto 3D	20 h
Estrazione di 6 profili (manuale)	1 h	Estrazione di 6 profili in modo semi automatico	10 min
Produzione di DEM automatico con passo 1 cm	2 h	Il DEM è la nuvola di punti	
Orthofoto da singolo modello	1 h	Orthofoto da singola scansione	1 h

Tabella 1: Tabella comparativa dei tempi necessari per ottenere i prodotti finali

Dall'analisi svolte si può affermare che nel settore laser scanner l'attuale offerta del mercato è in grado di soddisfare abbastanza pienamente le esigenze di rilievo metrico in ambito architettonico e urbanistico: ogni strumento è in grado di soddisfare, a seconda dei modelli, una più o meno ampia gamma di applicazioni.

Si può ritenere che i problemi maggiori siano legati alla non completezza operativa dei vari software, che obbliga l'utente a far uso di più programmi. Tuttora il trattamento dei dati acquisiti non è affatto operazione banale: essa deve essere condotta con grande attenzione e ogni singola fase (dal pretrattamento alla modellazione e alla mappatura) deve essere eseguita con cura, analizzando e validando i risultati via via acquisiti, selezionando con

altrettanta attenzione i software da impiegare. Si deve considerare che la fase di trattamento dei dati occupa una parte preponderante nell'economia del lavoro e che si devono scegliere non solo il modello di laser scanner ma anche i software in modo da ottenere dei risultati che rispondano alle richieste di precisione normalmente rivolte ad un lavoro di rilievo (Guerra, et. al., 2003)



Figura 5 Prodotto finale ricavato da fotogrammetria



Figura 6: Prodotto finale ricavato da laser a scansione

4.1.2 UTILIZZO INTEGRATO DI FOTOGRAMMETRIA E LASER A SCANSIONE

In seguito a svariate problematiche di rilievo affrontate, la comunità scientifica internazionale riconosce all'utilizzo integrato delle due tecniche la soluzione ottimale per un rilievo accurato dal punto di vista metrico, dotato della ricchezza di particolari necessaria per descrivere in modo completo un oggetto.

Una delle caratteristiche più recenti introdotte nella strumentazione per il laser scanning è la possibilità di acquisire non solo le tre osservazioni che permettono di calcolare le coordinate X,Y,Z di ogni punto, ma anche i valori RGB corrispondenti al singolo punto. Per poter ottenere dei valori RGB accurati e con risoluzione spaziale che superi quella della scansione alcune case produttrici hanno assemblato in modo solidale al laser-scanner una fotocamera digitale pre-calibrata. Questa fotocamera si configura esattamente come un fototeodolite in quanto è possibile registrare direttamente la posizione e l'orientamento di ogni singolo scatto nel sistema di riferimento laser scanner.

Sono infatti noti da calibrazione i 6 parametri (3 rotazioni e 3 traslazioni) che permettono il passaggio dal sistema scanner al sistema camera.

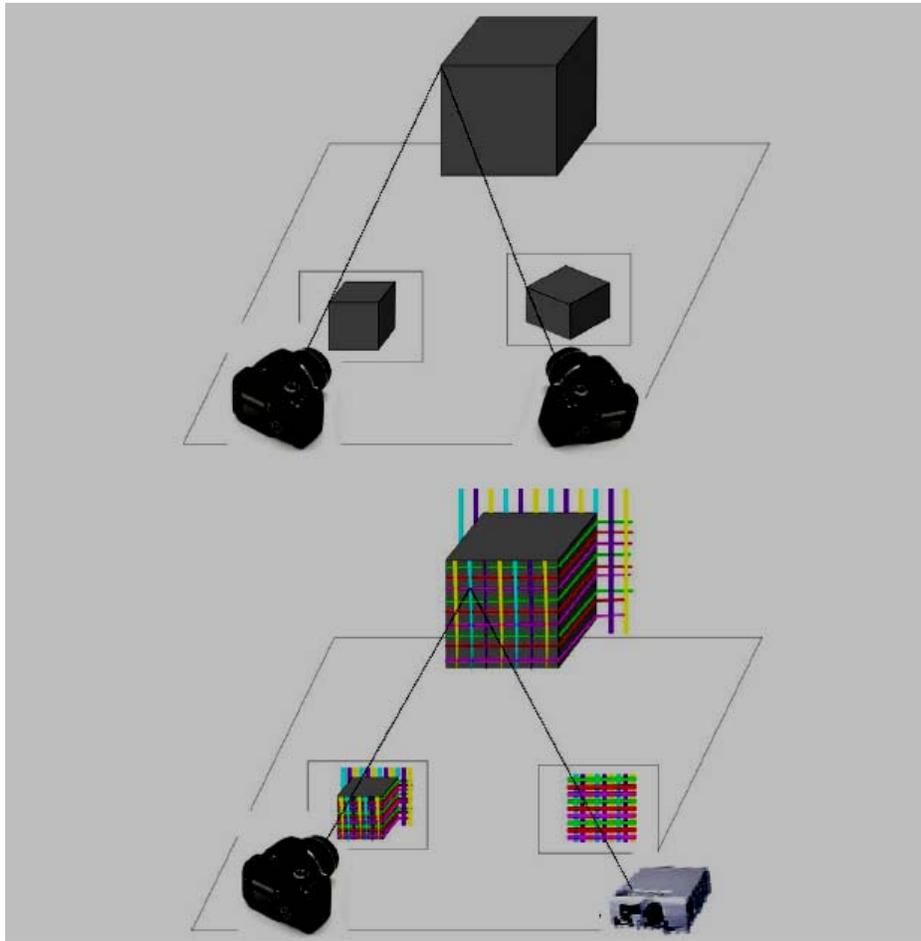


Figura 7: Confronto schematico fra l'approccio dei sensori passivi (in alto) e dei sensori attivi (in basso) nel rilievo.

Nei sensori passivi:

- ✓ Il problema della corrispondenza dei punti omologhi è risolto con misure automatiche o semi – automatiche
- ✓ Ci sono vincoli geometrici fra i punti omologhi (ad esempio geometria epipolare)
- ✓ La ricostruzione 3D della coppia di punti omologhi avviene per triangolazione

Nei sensori attivi:

- ✓ Una delle camere è replicata da un emettitore di luce
- ✓ Il problema della corrispondenza è risolto cercando il pattern nella camera (decodificazione)

Entrando più in dettaglio, la fotogrammetria è una tecnica di rilievo che utilizza la luce ambientale (*passive vision*), per fornire una descrizione completa della morfologia e delle caratteristiche di un oggetto. Grazie agli enormi sviluppi compiuti negli ultimi 20 anni dall'elettronica e dall'informatica, si utilizzano oggi prevalentemente camere digitali, ma il principio di funzionamento della fotogrammetria rimane la triangolazione, lo stesso principio utilizzato dagli scanner triangolatori. Proprio in ragione del principio di funzionamento, per ottenere una misura tridimensionale con questa tecnica sono necessarie almeno due immagini che ritraggano la stessa porzione di oggetto da due angolazioni differenti.

Si può quindi capire come il rilievo di strutture di grandi dimensioni richieda una fase di acquisizione molto lunga e ben progettata, al fine di ottenere una notevole sovrapposizione tra immagini adiacenti per una completa descrizione dell'oggetto.

Dal punto di vista dell'estrazione delle caratteristiche geometriche, poi, è richiesta una lunga fase di processamento dei dati e, nonostante l'elevato grado di automazione offerto dai più moderni pacchetti software, un notevole intervento da parte dell'operatore. Senza considerare la necessità di un rilievo topografico in situ, tale da garantire la georeferenziazione del modello tridimensionale ottenuto dal processo fotogrammetrico.

Come si è già ampiamente spiegato, gli strumenti laser scanner utilizzano il laser o la proiezione di luce strutturata (*active vision*) per poter effettuare misure di punti. Il dato che si ottiene è da subito tridimensionale e, qualora

fosse nota la posizione dello strumento, facilmente inseribile in un sistema di coordinate note.

D'altro canto, gli scanner non forniscono le caratteristiche descrittive dell'oggetto (colori, materiali, stato di degrado, ecc); al più possono registrare l'intensità del segnale di ritorno, fornendo quindi una visione in toni di grigio, che è spesso di difficile interpretazione per l'operatore e non consente di descrivere l'aspetto prettamente visivo dell'oggetto rilevato.

Confrontando le due tecniche si può capire in quale modo il loro utilizzo integrato consenta di colmare le reciproche lacune.

Innanzitutto la maggior parte dei dati che possono essere raccolti mediante uno scanner sono ottenibili anche utilizzando la fotogrammetria dei vicini.

Analizzando i pro e contro delle due tecniche si può invece osservare che mentre per l'acquisizione fotogrammetrica è necessaria la presenza di *texture* e di opportune condizioni di illuminazione per poter determinare gli spigoli ed i contorni di un oggetto, uno scanner determina gli stessi dati indipendentemente da questi requisiti. Per contro un rilievo fotogrammetrico è molto più flessibile, data la portabilità delle camere (molto più leggere di uno scanner) e l'opportunità di utilizzo senza treppiede. Inoltre gli scanner hanno un costo molto più elevato rispetto agli strumenti utilizzati in fotogrammetria e dotati della medesima precisione (il fattore di proporzione tra i costi è di 10/1).

La fotogrammetria, però, richiede una procedura di orientamento piuttosto complessa prima di poter estrarre informazioni tridimensionali da una coppia di immagini, mentre le differenti scansioni ottenute con un laser possono essere unite in modo molto semplice e rapido.

La creazione di un modello TIN, necessario per la visualizzazione dell'oggetto, avviene in maniera diretta e quasi automatica per dati ottenuti da laser, mentre le immagini fotogrammetriche richiedono una fase di *image matching* preventiva per poter creare un set di punti tridimensionali da utilizzare per la modellazione dell'oggetto.

Infine i laser scanner creano una “quasi – immagine” dell’oggetto, mentre le immagini fotogrammetriche forniscono la possibilità di creare un database di elevata qualità visiva, molto adatto per rivestire un modello 3D.

Entrambe le tecniche necessitano, in funzione dell’oggetto rilevato, di un consistente intervento da parte dell’operatore per convertire il dato tridimensionale in un vero e proprio modello 3D. Inoltre per arrivare ad una corretta interpretazione dei punti acquisiti con laser scanner, un operatore deve aver accesso ad un supporto visivo mediante video o fotografia.

In conclusione, le due tecniche sono tra loro perfettamente complementari: mentre la fotogrammetria produce un modello facile da interpretare utilizzando le informazioni di colore, il laser è in grado di descrivere la geometria tridimensionale di un oggetto con elevata risoluzione ed in modo automatico. Proprio per questi motivi l’attuale tendenza dei produttori è di fornire dei laser scanner dotati di camere digitali calibrate ed in posizione nota, così da garantire una rapida e facile integrazione tra le due tipologie di dati (Bornaz et al., 2004).

4.2 TEXTURE MAPPING

Il Texture mapping è la possibilità di “plasmare” le fotografie sul modello solido. I software di fotogrammetria digitale, permettono il calcolo dei parametri dell’orientamento esterno delle immagini e la successiva “ortoproiezione” sul modello triangolato.

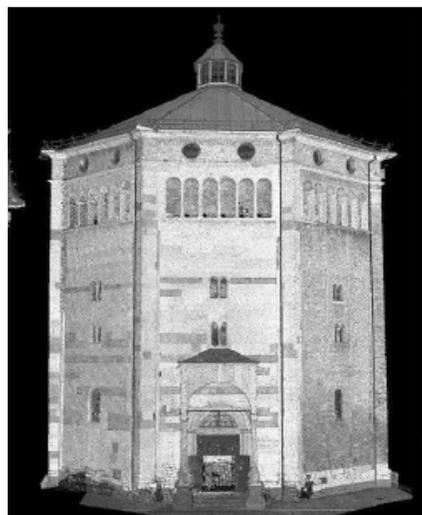


Figura 8: Fotografia e modello DSM (in alto) che compongono la texture mapping (in basso), da (Conforti Andreoli et al., 2003)

Nella comunità fotogrammetrica i primi esperimenti sulla visualizzazione di modelli 3D riguardavano oggetti (ad es. automobili) in modalità wireframe e restituzioni architettoniche visualizzate con ortofoto statiche; poi con l'avvento di software e computer più veloci e potenti anche dal punto di vista grafico, si è giunti alle moderne rappresentazioni tridimensionali foto-realistiche.

Alcuni accorgimenti utili da tenere in conto durante il rilievo sono di acquisire immagini con angolo di presa della camera simile a quello tenuto dal laser durante la scansione, utilizzare una fotocamera con buona risoluzione (se digitale, con dimensione del CCD superiore a 3.2 MPixel) e mantenere il medesimo zoom per contenere il numero dei parametri di calibrazione da stimare (Bornaz et al., 2002, 1 e 2)

I parametri da definire sono sostanzialmente i parametri di orientamento interno della fotocamera (una serie di parametri di un polinomio di autocalibrazione) congiuntamente a quelli di orientamento esterno (6 per ogni immagine).

Il risultato finale è quello di avere il modello solido triangolato con la colorazione delle singole mesh data dalle immagini fotografiche.

Con la fase di texturing, le immagini a colori sono mappate sopra la superficie geometrica 3D; conoscendo i parametri di orientamento interno ed esterno delle immagini, le corrispondenti coordinate immagine sono calcolate per ogni vertice di un triangolo sulla superficie 3D; quindi i valori di colore RGB all'interno del triangolo proiettato sono attaccati alla faccia dello stesso. Nel caso di texture multi – immagine si fa generalmente una media dei valori RGB trovati.

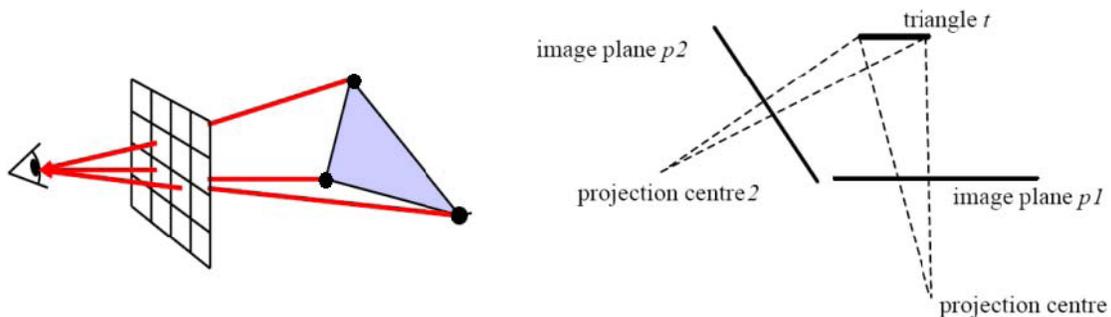
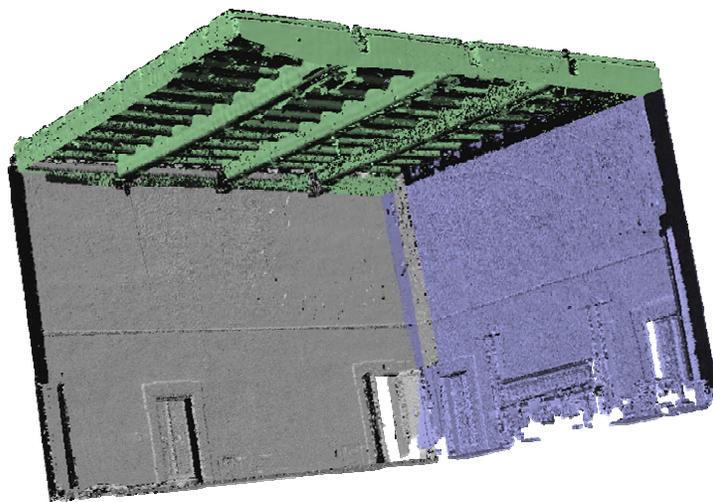
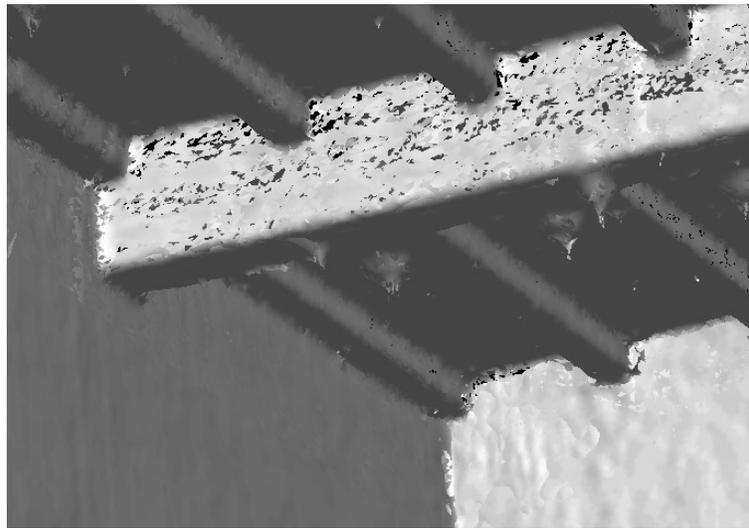
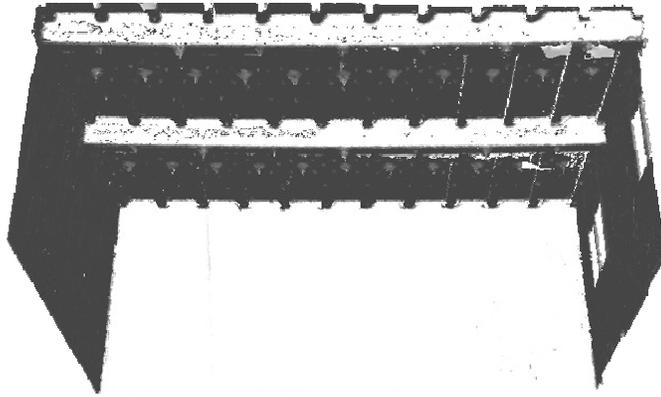


Figura 9 Schematizzazione del photo texturing in approccio a singola o multi-immagine

Le problematiche in questo processo possono essere diverse e sono dovute a:

- ✓ Distorsioni radiometriche nelle immagini, dovute ad acquisizioni con differenti camere, da differenti posizioni e con differenti condizioni di luce;
- ✓ Distorsioni geometriche dovute a scorrette procedure di orientamento;
- ✓ Occlusioni dovute ad oggetti fermi o in movimento, alberi, auto, ecc., davanti all'area in esame, da rimuovere in fase di pre-processamento;
- ✓ Le immagini digitali possono presentare, spesso per le foto degli ambienti interni, problemi di basso range dinamico, cioè, per vedere le zone scure si deve sovraesporre e quindi si saturano le zone illuminate e viceversa per vedere le zone illuminate si deve sottoesporre, rendendo nere le zone non illuminate; la soluzione sono le immagini cosiddette high dynamic range, che combinano in un'unica immagine le informazioni di radianza di una sequenza di immagini standard. (Conforti Andreoli et. al., 2003)

Per la visualizzazione dei prodotti finali, ottenuti in questa tesi, si è scelto di visualizzare un particolare del soffitto e del fregio dei Carracci, molto rappresentativo dei particolari da cogliere. Nel seguito saranno esposti i risultati ottenuti dal solo rilievo laser.



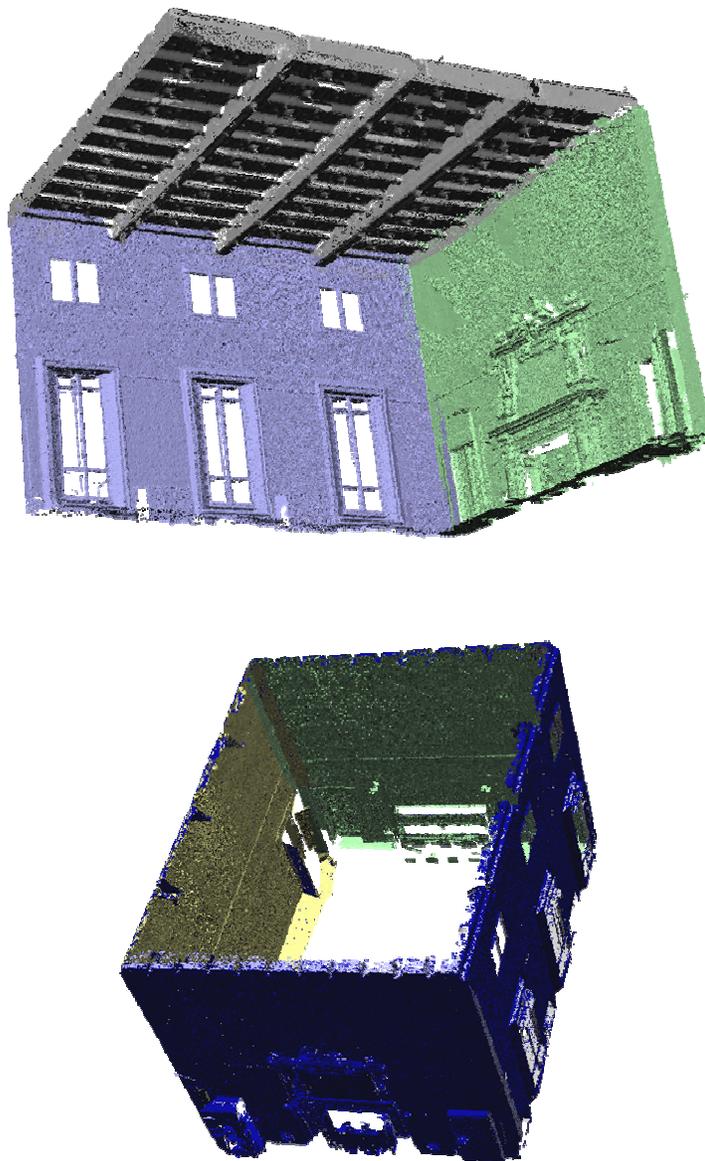


Figura 10: Particolari dei prodotti finali ottenuti dalla rilevazione laser

I prodotti finali ottenuti con uno strumento laser, come abbiamo visto precedentemente, possono essere sensibilmente migliorati utilizzando l'applicazione di texture fotografiche.

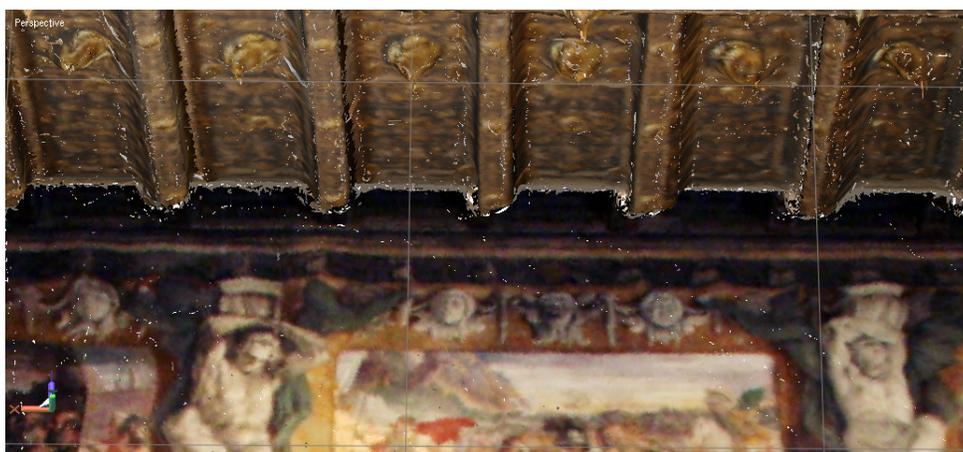


Figura 11: Particolare dell'applicazione di texture fotografiche su DSM generato da rilevazione laser.

L'applicazione di texture fotografiche ha richiesto un lungo lavoro di post processing. Le operazioni che sono state eseguite per ottenere il miglior prodotto finale sono state: levigazione delle superfici e applicazione di

procedure di image processing come l'histogram matching. L'istogramma di una immagine è la frequenza con la quale appaiono i valori dei digital number dei pixel di una immagine. In particolare, l'istogramma indica in quali porzioni dell'immagine è presente l'informazione. L'histogram matching consente di equalizzare gli istogrammi rendendo minori le influenze derivanti dalla variazione di illuminazione.

4.3 CONSIDERAZIONI SULLA SEGMENTAZIONE DEI DATI

L'applicazione della segmentazione dei dati in rilievi laser terrestri trova motivazione nella notevole densità e complessità che usualmente essi presentano. Con il termine segmentazione si intende l'estrazione di informazioni geometriche dall'insieme dei dati e la loro partizione in entità omogenee secondo criteri specifici. Tali tecniche, basate in genere su procedure completamente o parzialmente automatiche, consentono di organizzare su differenti layer le porzioni di punti che presentano caratteristiche comuni.

Fino ad oggi le tecniche di segmentazione hanno visto applicazione soprattutto nelle scansioni laser aeree, consentendo di ottenere buoni risultati con la suddivisione del database in porzioni relative per esempio a edificato, alberi, terreno, ecc.. La segmentazione dei dati laser per modelli complessi in ambito architettonico è per certi versi di difficoltà molto maggiore ma presenta notevole interesse nell'ottica di passare da un archivio tridimensionale di difficile gestione, qual è il risultato di un rilievo laserscanning terrestre, a prodotti più prossimi a quelli usualmente adottati dagli addetti ai lavori, nei quali per esempio siano delineati, anche per via grafica, gli elementi architettonici principali..

In generale si può affermare che la segmentazione è una procedura molto complicata da applicare e, se potesse essere realizzata in modalità completamente automatica dai software commerciali disponibili,

consentirebbe la realizzazione di vari prodotti finali ad hoc fino alla sostituzione di altre metodologie di rilievo.

I livelli nei quali può essere realizzata l'operazione sopra elencata sono differenti: si può, come è stato fatto in questa tesi, suddividere la mole di dati iniziale in parti più piccole per migliorare gli aspetti della gestione del dato; migliori risultati potrebbero essere ottenuti riuscendo a scomporre ulteriormente le parti essenziali delle singole pareti combinandole su layer diversi (per esempio nel caso in questione un layer per le finestre, uno per le porte, uno per il fregio e altri per il soffitto.)

In letteratura sono presenti vari esempi di differenti metodologie di segmentazione, si vogliono qui citare la segmentazione automatica, la segmentazione attraverso i piani principali dell'oggetto e la segmentazione utilizzando l'analisi delle componenti principali (Bornaz et. al, 2003).

4.4 RILIEVO, ANALISI E RAPPRESENTAZIONE MULTISCALA

La molteplicità degli oggetti da rilevare in campo architettonico e l'ampio numero di metodologie utilizzabili possono generare infinite combinazioni, tra le quali deve cadere la scelta in base all'utilizzo del prodotto finale. Caratteristica importante del rilievo dei Beni Culturali è che spesso gli oggetti di interesse possiedono dimensioni molto variabili. In questi casi, vista la grande difformità di dimensioni, si possono o si devono necessariamente utilizzare approcci di rilievo gerarchici e multiscala, in cui diversi oggetti vengono rilevati separatamente ed utilizzando anche strumenti totalmente differenti fra loro; nei diversi rilievi si ottengono così precisioni diverse e si hanno diverse tipologie di prodotti finali, possibilmente in sistemi di riferimento comuni o omogenei tra loro.

Nel caso presentato le possibilità offerte da un rilievo multi-scala dell'oggetto sono state evidenziate eseguendo rilievo a maggiore risoluzione per alcuni particolari architettonici di interesse.

Il rilievo è stato eseguito in due sessioni di misura, considerando un particolare del soffitto a cassettoni; le operazioni di allineamento sono state complicate non conoscendo la reciproca posizione delle due stazioni. Per limitare la zona di acquisizione ad un'area ristretta è necessario eseguire una scansione iniziale e, tramite il PC che comunica con lo scanner, selezionare l'area interessata per un'acquisizione a maggiore risoluzione. Per allineare le due scansioni si è dovuto procedere nel modo seguente: i particolari sono stati importati su tutte le scansioni relative al soffitto per cercare con quale ci fosse una perfetta corrispondenza, essendo l'oggetto caratterizzata da una forte ripetibilità di elementi uguali; trovate le due scansioni del soffitto, che corrispondevano con l'orientamento dei particolari, esse sono state allineate per avere una visione generale e confrontare quali effetti un aumento di sensibilità dello strumento potesse dare sul rilievo. In figura possiamo notare una nuvola di punti che raffigura il soffitto con i particolari a risoluzione maggiore.

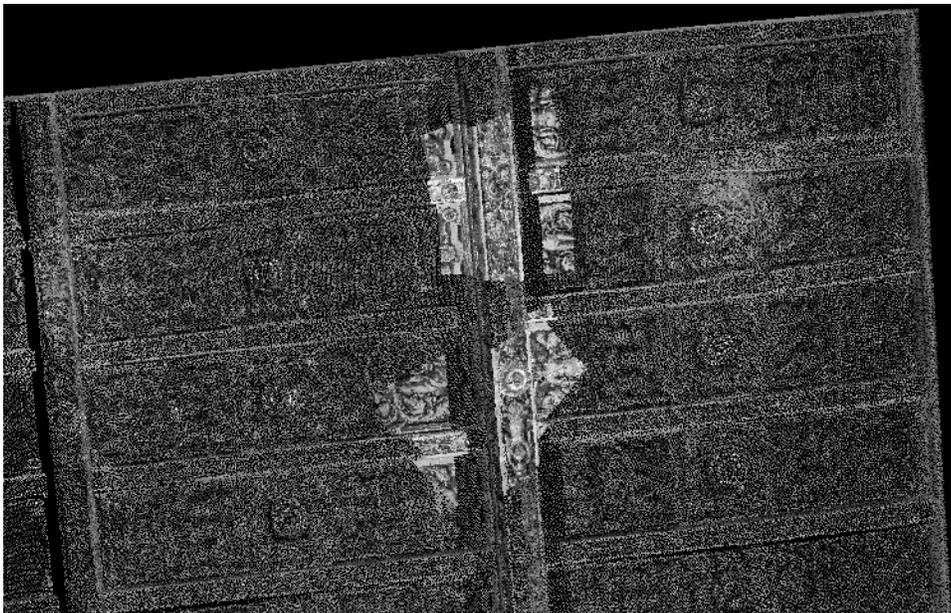


Figura 12: Visualizzazione combinata di scansioni a risoluzioni diverse



Figura 13: particolare del soffitto texturizzato

Si può notare come la zona a maggior risoluzione sia chiaramente più ricca di informazioni; infatti i particolari sono costituiti da circa 1.000.000 di punti mentre tutta la scansione del soffitto da 900.000 punti. La realizzazione di una scansione a questa risoluzione del soffitto intero porterebbe certamente a risultati eccezionali, ma la dimensione dei file, il tempo impiegato per il rilievo e i software non ancora capaci di trattare con efficienza nuvole così dense, di fatto impedirebbero un'elaborazione esauriente.

4.1 POTENZIALITA' DEL LASER A SCANSIONE NELLO STUDIO E NEL MONITORAGGIO DI DISSESTI STRUTTURALI

Il controllo periodico della costruzione rappresenta il principale strumento per una consapevole conservazione, in quanto consente di programmare la manutenzione ed attuare in tempo, quando realmente necessari, gli interventi di riparazione in caso di danno strutturale e di consolidamento, finalizzato alla prevenzione.

Per impostare un programma di monitoraggio è necessario definire una serie di grandezze o caratteristiche, da misurare e/o verificare in continuo o a scadenze ravvicinate, che consentano di realizzare e tenere aggiornata una sorta di carta di identità dell'edificio, che ne certifichi il buon comportamento ed il persistere delle condizioni di sicurezza precedentemente accertate.

Il monitoraggio visivo, inteso come controllo periodico dell'insorgenza di stati fessurativi, fenomeni di degrado, trasformazioni nella struttura e nell'ambiente circostante, rappresenta il punto di partenza di tale attività.

Informazioni aggiuntive possono essere acquisite attraverso il monitoraggio strumentale di alcuni parametri ritenuti significativi (movimento delle lesioni, spostamenti assoluti o relativi di punti della costruzione, rotazione di pareti o altri elementi). Il movimento delle lesioni può essere controllato pressoché in continuo e a distanza; occorre tuttavia considerare che, in relazione alla tipologia di dissesto, le soglie di pericolosità di tali spostamenti relativi possono essere anche molto diverse (molto pericolosi sono i fenomeni di schiacciamento per compressione della muratura).

Il controllo geometrico della costruzione può essere eseguito mediante procedure di rilievo topografico o utilizzando tecniche innovative, come la nuvola di punti generata dal laser scanner (ovviamente tale metodologia non

risulta esclusiva e deve essere attentamente valutata la precisione fornita in relazione alle soglie di movimento ritenute significative). Il progetto di monitoraggio richiede una preliminare interpretazione del meccanismo di dissesto, che può spesso essere eseguita grazie alla meccanica dell'equilibrio delle murature considerate come corpo rigido; ciò permette di individuare una serie di punti notevoli da controllare. In alcuni casi, quando l'eventuale dissesto è ben compreso e possono essere definite soglie di sicurezza, il monitoraggio può rappresentare un'alternativa all'intervento, a vantaggio della conservazione.

Le proprietà dinamiche della struttura (frequenze e forme proprie di vibrazione) sono anch'esse parametri significativi del comportamento di una costruzione. In presenza di dissesti o trasformazioni della costruzione e del suo uso, queste grandezze subiscono delle alterazioni. Allo stato attuale delle conoscenze, l'identificazione del danno sulla base di una variazione delle proprietà dinamiche è pressoché impossibile; inoltre, è noto che le costruzioni in muratura sono caratterizzate da un comportamento fortemente non lineare e ciò rende problematico il ricorso a parametri rappresentativi di un comportamento lineare equivalente.

Tuttavia, il controllo di alcuni parametri della risposta dinamica può, in alcuni casi, rappresentare uno dei possibili elementi per l'identificazione di un cambiamento manifestatosi nella costruzione. La scelta dei parametri e l'interpretazione delle misure dinamiche vanno giustificate in relazione alla tipologia di dissesto ed agli scopi delle indagini.

Se si considera più in particolare la sicurezza sismica, essendo il terremoto un evento raro ed imprevedibile, è evidente che il monitoraggio non rappresenti uno strumento di allarme o di individuazione del comportamento sismico. Un suo uso può risultare significativo nell'emergenza post-terremoto, su strutture fortemente danneggiate di cui si volesse verificare l'evoluzione del meccanismo attivato dal sisma e la risposta ad eventuali scosse di replica.

La seconda applicazione che ha consentito di studiare più approfonditamente le potenzialità dello strumento è stato per l'appunto il rilievo di una fessurazione presente sulla facciata della chiesa di San Giacomo a Bologna; l'edificio è stato oggetto nel corso degli ultimi decenni di diversi interventi di restauro e consolidamento per i problemi che esso presentava, legati alla sua collocazione in una zona soggetta a subsidenza. Va sottolineato che per un'applicazione come quella che si sta descrivendo non sarebbe a rigore idonea la strumentazione utilizzata, in quanto sarebbe stato più opportuno utilizzare un laser scanner triangolatore che permette il raggiungimento di precisioni più elevate; i risultati presentati nel caso in esame sono comunque risultati soddisfacenti.

Per questioni logistiche, la fessurazione è stata ripresa da una sola stazione, e quindi non è possibile la visione di tutte le sue parti; lo strumento ha operato da una distanza di circa dieci metri, simulando la situazione di un rilievo eseguito su costruzioni pericolanti e non accessibili.

Le valutazioni sulla capacità dello strumento sono state fatte solamente sulla descrizione geometrica della fessurazione e sulla profondità alla quale lo strumento riusciva a identificare le coordinate dei punti.

Il procedimento si è suddiviso nelle seguenti fasi:

- ✓ La nuvola è stata esportata da Faro Scene ed importata in Rapidform, non applicando filtri di nessun tipo su nessuno dei due software per non alterare e degradare le informazioni rilevate.



Figura 1: Nuvola dei punti 3D con applicazione del livello di grigio secondo il valore di riflettanza

- ✓ E' stata generata una mesh della nuvola e anche in questo caso non si sono applicati filtri di nessun tipo.
- ✓ Utilizzando i diversi metodi di visualizzazione disponibili nel software (visualizzazione dei punti, dei triangoli e delle linee nascoste) si sono individuati i punti più profondi della fessura e i punti più vicini sulla superficie non fessurata.

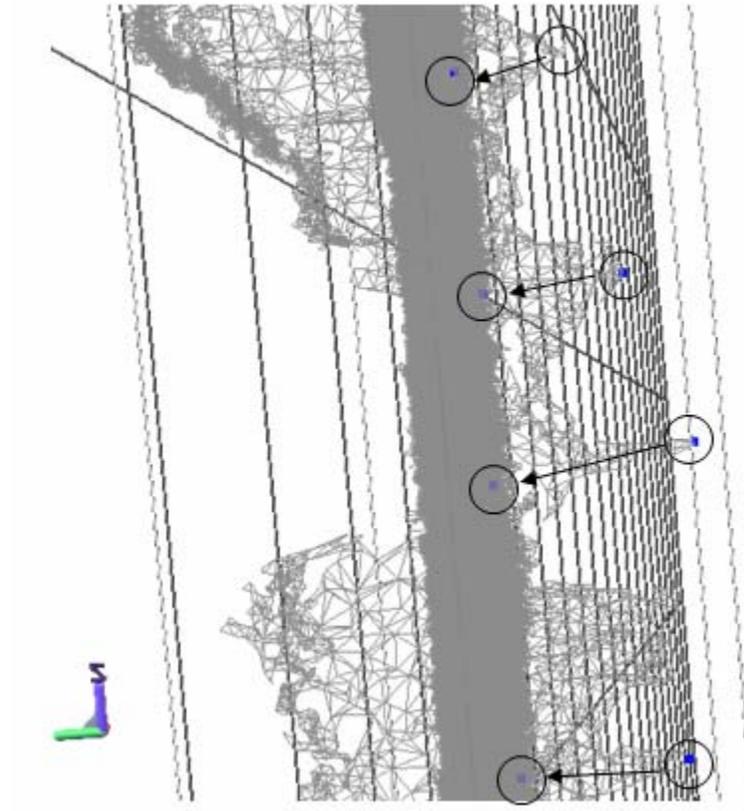


Figura 2: Schermata di rapidform utilizzata per la valutazione della profondità della fessura

- ✓ Utilizzando la funzione di misura delle distanze si è trovata la profondità della fessura; i valori ottenuti sono solo indicativi perché nella distanza sono considerate tutte le coordinate e non solo la componente di profondità, ma in prima approssimazione i dati possono essere considerati attendibili.

Nel seguito sono riportate le tabelle fornite in output dal programma:

```
* Point 1 : 90.87902, -10614.43315, 2180.07592
* Point 2 : 82.70678, -10573.87647, 2174.69864
* Distance : 41.71984 mm
* Displacement : -8.17225, 40.55668, -5.37728
```

```
* Point 1 : 77.48217, -10650.13030, 2034.42103
* Point 2 : 83.84078, -10575.68082, 2025.12722
* Distance : 75.29630 mm
* Displacement : 6.35861, 74.44949, -9.29381
```

```
* Point 1 : 78.09074, -10629.18471, 2097.29049
* Point 2 : 84.69634, -10577.38253, 2094.29707
* Distance : 52.30737 mm
* Displacement : 6.60560, 51.80219, -2.99341
```

```
* Point 1 : 150.38479, -10637.77337, 1916.09800
* Point 2 : 153.13912, -10572.90860, 1913.44174
* Distance : 64.97754 mm
* Displacement : 2.75433, 64.86477, -2.65626
```

Le misurazioni ottenute per via strumentale sono state confrontate con le reali misure della fessura valutate in loco: entrambe le valutazioni hanno attestato un valore di misura della fessura di circa 5,5 cm, confermando i risultati del rilievo. La rappresentazione della fessurazione è risultata di buona qualità, e, pur con le riserve già espresse ad inizio paragrafo sulla tipologia dello strumento da impiegarsi in questi casi, si può affermare che essa sia stata descritta con dettaglio sufficiente a supportare eventuali rimisurazioni successive nel tempo, in una attività quindi di monitoraggio.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia per la collaborazione e la disponibilità dimostrata la Ditta FARO, in particolare nella persona del Dr. Fabio Gallo, e UNICREDIT BANCA per avere concesso l'accesso al Palazzo Magnani per l'esecuzione del rilievo.

Un sentito ringraziamento va rivolto al professor Bitelli per la sua disponibilità, i consigli e la professionalità dimostrata in occasione dell'ideazione e della stesura di questa tesi.

Si ringrazia inoltre i Correlatori, professor Luca Vittuari e dottoressa Valentina Girelli, per il lavoro svolto e la collaborazione dimostrata.

CONCLUSIONI

Questa tesi ha inteso valutare le potenzialità del rilievo con laser a scansione terrestre nel settore dei Beni Culturali, valutandone i benefici ed i costi nei confronti di altre tecniche nonché le possibilità di integrazione con esse. La tecnologia del laser a scansione è stata sperimentata sia con l'ottica di "fermare" la situazione di un oggetto nelle sue caratteristiche geometriche, di forma e di colore, sia con l'intento di verificare come questa metodologia possa avere utilizzi differenziati per scopi specifici.

Il caso di studio che si è scelto, il salone d'onore di Palazzo Magnani in Bologna, è di grande interesse da un punto di vista artistico ed architettonico, per i capolavori che vi sono conservati, ed è anche significativo per la sperimentazione della tecnica.

Nella tesi, dopo una parte introduttiva sulle tipologie dei sistemi laser in commercio, è stata descritta in dettaglio la fase di elaborazione e gestione dei dati relativi all'oggetto del lavoro, discutendo gli aspetti principali emersi. Appare subito evidente la velocità di acquisizione di dati che questo tipo di strumenti consente, soprattutto confrontata all'enorme quantità di informazione che è possibile ottenere; al contempo l'attenzione si è soffermata sulla necessità di un consistente intervento da parte dell'operatore nella gestione dei dati acquisiti, con la conseguente esigenza di lunghi tempi di elaborazione e di software capaci di gestire la modellazione di superfici irregolari.

I prodotti finali ottenuti da una elaborazione dei dati laser, che generano un DSM della superficie, possono essere resi più leggibili e di maggiore espressività unendo al dato metrico la ricchezza di informazioni derivante dalla fotografia, tramite l'applicazione di texture fotografiche.

La maggiore limitazione nell'utilizzo di queste tecniche è risultata essere la richiesta di hardware e software molto potenti, e la necessità di esperienza dell'operatore nell'esecuzione di specifiche procedure. Riguardo al primo aspetto, si è verificato che la realizzazione di un modello texturizzato richiede tempi molto lunghi per l'elaborazione dei dati e software che possano gestire dimensioni di file molto elevate. Per una miglior realizzazione dei prodotti finali, è necessario suddividere il progetto così da riuscire a gestire in modo opportuno i dati disponibili.

Nel caso specifico del rilevamento in Palazzo Magnani, si è scelto di selezionare solo un particolare del Salone d'Onore (comprensivo di tre pareti e soffitto) così da cogliere l'essenza dei problemi relativi al rilievo. I prodotti finali sono di indubbio interesse, anche se presentano ancora delle limitazioni, in gran parte dovute all'effettuazione di un rilievo primario molto speditivo, non assimilabile a quanto verrebbe eseguito in una realizzazione professionale; per esempio, sono presenti alcuni punti nei quali la texture non ha trovato triangoli della mesh sui quali aderire, e ciò si può attribuire alla non perfetta planarità delle superfici, dovuta al livello di dettaglio della scansione che localmente non è sufficiente.

L'accuratezza del dato metrico è comunque testimoniata dal fatto che, nonostante una segmentazione eseguita sui dati a fini di migliorarne gli aspetti della gestione (divisione nelle pareti principali), il prodotto finale (cioè l'unione dei vari dati segmentati) fa coincidere perfettamente l'ammorsamento delle travi in legno nelle pareti in muratura.

Sono state infine effettuate alcune sperimentazioni specifiche, sia per la valutazione delle problematiche e possibilità di rilievi multiscala (di grande interesse per consentire analisi differenti per differenti utilizzatori del dato), sia per verificare come questa strumentazione possa essere usata per scopi diversi dalla documentazione e rappresentazione geometrica di un oggetto nel suo insieme, nell'ottica invece di un controllo e rilievo di altissimo dettaglio di particolari legati al dissesto di una struttura (per es.

fessurazioni): si tratta di un'applicazione che, come esposto nella tesi, richiederebbe altro tipo di tecnologia, ma che ha comunque dato un riscontro positivo anche con lo strumento utilizzato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Bornaz (2004), “Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione”, Tratto da laser scanning terrestre F. Crosilla, S. Dequal (2006)
- [2] D. Visintini, B. Fico, A. Spangher (2006), “Modellazione 3D dell’ambiente urbano mediante integrazione di scansioni laser aeree e terrestri: l’esempio del castello di Gorizia”.
- [3] W. Boehler, A. Marbs (2004), “Comparing different laser scanner.”
- [4] D. Barber, J. Mills (2005), “Laser scanning data format-discussion document” University of Newcastle.
- [5] D. Barber, J. Mills (2005), “The LAS format”, University of Newcastle.
- [6] Brochure Faro LS880
- [7] Manuale Faro Scene
- [8] A. Beinat, F. Crosilla, (2006) “Tecniche di allineamento”
- [9] M. Alba, A. Giussani F. Roncoroni (2005) “Analisi delle precisioni ottenibili nella determinazione di punti con laser scanning terrestre utilizzando la georeferenziazione diretta”, Arkos, n. 3/2002, 36-43.
- [10] M. Alba, A. Giussani F. Roncoroni (2005) “Analisi delle precisioni ottenibili nella determinazione di punti con laser scanning terrestre utilizzando la georeferenziazione diretta”, Arkos, n. 3/2002, 36-43.
- [11] A. Beinat (2004), “Tecniche di registrazione”, Tratto da laser scanning terrestre F. Crosilla, S. Dequal (2006)
- [12] Chen, Y., and Medioni, G., 1992: “Object modeling by registration of multiple range images”. *Image and Vision Computing*, 10 (3), 145-155.
- [13] Remondino, F., 2006: “Image - based modeling for object and human reconstruction”. *Mitteilungen Nr. 91*, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Switzerland.
- [14] F. Guerra, L. Pilot, P. Venier (2003) “Fotogrammetria e laser scanning: alternativa?”
- [15] L. Bornaz, A. Lingua, S. Dequal (2004), “Integrazione del laser scanning con la fotogrammetria digitale: applicazioni di rilievo architettonico e ambientale”

- [16] Bitelli G. (2002) “Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali”. Relazione invitata in: Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA “Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale”, vol. I, Perugia, pagg. IX-XXIV.
- [17] Bornaz L., Lingua A., Rinaudo F. (2002) “Il trattamento dei dati Laser Scanner nelle applicazioni terrestri”. Atti della 6° Conferenza Nazionale ASITA “Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale”, vol. I, Perugia, pagg. 487 – 492.
- [18] Bornaz L., Lingua A., Rinaudo F.(2002) “Calibrazione di immagini non metriche mediante l'uso dei dati laser scanner terrestri”. Atti della 6a Conferenza Nazionale ASITA “Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale”, vol. I, Perugia, pagg. 493 – 498.
- [19] D. Conforti Andreoli, Livio Pinto (2003)” Il texture mapping del Battistero di Cremona ottenuto con riprese fotogrammetriche digitali e laser scanner terrestre”
- [20] Bornaz L., Rinaudo F., Roggero M. (2003)” Prove di segmentazione su rilievi laser scanner di tipo terrestre”