

Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione

Leandro Bornaz¹

¹ Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente del Territorio e delle Geotecnologie,
Politecnico di Torino, Corso duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italia
Tel. +39.011.564.7687 Fax. +39.011.564.7699
Email: leandro.bornaz@polito.it

Abstract. La tecnica del laser scanning rappresenta un nuovo ed efficiente metodo per la digitalizzazione e la modellizzazione di oggetti e di porzioni di territorio aventi qualsiasi forma e dimensione. La digitalizzazione avviene in modo discreto attraverso la misurazione della posizione di un elevato numero di punti. La tecnica del laser scanning si basa sul metodo di misurazione delle distanze per mezzo di onde elettromagnetiche, anche noto con il nome LIDAR (*light detection and ranging*).

Questa tecnica di misura nasce nel 1933 grazie al sovietico Balaicov che brevettò il primo distanziometro ad onde ed il connazionale Lebedev che ne costruì il primo prototipo nel 1938. A partire dagli anni '70 furono messi in commercio, a prezzi accessibili anche alla piccola utenza, i primi distanziometri ad onde. Questa introduzione ha decretato la fine del rilievo delle distanze con metodi tradizionali a vantaggio di un metodo di misura avente precisione maggiore ed una più rapida esecuzione delle misure stesse.

La possibilità di misurare distanze con estrema facilità ha portato come logica conseguenza ad una rivoluzione dei metodi di rilevamento e di calcolo consentendo agli operatori di svincolarsi dai vecchi schemi di rilievo a favore di nuovi sistemi. A questi appartiene la tecnica di acquisizione laser scanner. In queste pagine si analizzano i metodi attraverso i quali avviene la digitalizzazione dei dati laser scanner ed i principi che regolano la fasi di acquisizione.

1 Il raggio laser

Dal punto di vista applicativo il laser è un'apparecchiatura che trasforma energia da una forma primaria (elettrica, ottica, chimica, termica o nucleare) in un fascio monocromatico e coerente di radiazioni elettromagnetiche di intensità elevata: la luce laser.

La scoperta fondamentale che ha permesso l'emissione della luce laser è dovuta ad A. Einstein nel 1917. Quest'ultimo ipotizzò, infatti, che l'emissione di un raggio di luce ad alta energia da un atomo può essere stimolata da un raggio di luce di una certa frequenza incidente a lui stesso. Da questo fenomeno è derivato il laser.

Il termine "L.A.S.E.R." è, infatti, acronimo di: "*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*" (amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione).

1.1 I generatori di luce laser

Per giungere alla realizzazione pratica dello strumento furono necessari alcuni decenni dal momento della scoperta fondamentale del fenomeno di Amplificazione della luce da emissione stimolata di radiazione (LASER).

Nel 1958 i fisici statunitensi Arthur Schawlow e Charles Hard Townes brevettarono il primo dispositivo laser, ma la paternità della scoperta venne reclamata dal loro connazionale Gordon Gould. Due anni dopo (1960) il fisico Theodore Maiman (ricercatore laboratori Huyghens-California) osservò il primo fascio laser in un cristallo di rubino e nello stesso periodo il fisico statunitense di origine iraniana Ali Javan costruì il primo dispositivo a elio-neon.

Il laser, come spiegato in precedenza, non è altro che una radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda luminosa, avente particolari caratteristiche:

- ⇒ deve essere composta da una sola frequenza di luce, non come la luce di una torcia che pur sembrando bianca (o colorata a seconda della lampadina utilizzata) è composta da molte frequenze di luce appartenenti allo spettro visibile all'occhio umano (monocromaticità).
- ⇒ deve essere composta da un'onda che non viene irradiata in tutte le direzioni come quella delle sorgenti di tipo tradizionale, ma si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità (coerenza spaziale o unidirezionalità).
- ⇒ deve essere costituita da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano l'una all'altra originando un treno di luce che può essere spinto ad elevata intensità e ad elevata potenza (coerenza temporale). In particolare la "potenza" della luce laser può giungere a livelli veramente incredibili. Recentemente al Lawrence Livermore Laboratory (California) è stato messo a punto un apparecchio da centoventimila miliardi di Watt.

Naturalmente una radiazione luminosa può avere una lunghezza d'onda differente. Nel caso del laser la radiazione può essere ultravioletta (avere cioè una lunghezza d'onda compresa tra i 200 e 400 nm), visibile (tra i 400 e i 700 nm) o infrarossa (tra i 700 e i 300 nm).

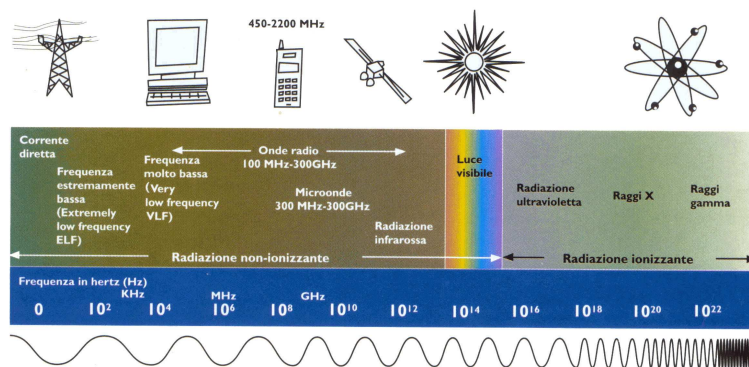


Figura 1. Schematizzazione dello spettro elettromagnetico

I laser vengono classificati, a seconda della natura del materiale attivo utilizzato (sostanza che produce la radiazione laser), in laser a stato solido, a gas, a semiconduttore, a liquido e laser a elettroni liberi. Possiamo ad esempio distinguere laser a: CO₂, Nd-YAG, Argon, fotochemioterapici, rubino, coloranti pulsati, diodi, eccimeri ecc...

- ⇒ Laser a stato solido
- ⇒ Laser a gas
- ⇒ Laser a semiconduttore
- ⇒ Laser a liquido
- ⇒ Laser a elettroni liberi

I laser trovano impiego in numerosissimi settori. Finora si sono dimostrati strumenti di grande utilità e importanza nell'industria, nella ricerca scientifica e nelle comunicazioni. Trovano inoltre importanti applicazioni in medicina, nella tecnologia militare e anche in campo artistico. Tra i numerosi ed interessanti esempi di utilizzo del laser si possono ricordare: l'utilizzo del laser 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.

1.2 I rischi biologici legati all'utilizzo del laser

I rischi connessi all'uso del laser sono sia quelli relativi alle caratteristiche intrinseche del fascio, sia quelli derivanti dalle apparecchiature che permettono di creare e mantenere questo tipo di radiazione. L'interazione **diretta** con il fascio interessa in modo particolare occhi e pelle.



- ⇒ L'occhio, per la sua configurazione anatomofunzionale e per il suo comportamento ottico, è l'organo più vulnerabile nei confronti della luce laser e rappresenta pertanto l'organo "critico" per eccellenza. A seconda della radiazione ottica (ultravioletto 100-400nm, visibile 400-760 nm, infrarosso 760-1mm) e dell'intensità di dose si possono avere diversi tipi di danno a carico di questo organo quali: danni retinici di natura fotochimica, alterazioni retiniche caratterizzate da piccoli addensamenti di pigmento, discromie, effetti catarattogeni di origine fotochimica e termica, fotocheratoconiuntivite, ustioni corneali.
- ⇒ Di minore importanza è l'eventuale danno a carico della cute e i più comuni sono: eritemi, ustioni cutanee, superficiali e profonde, la cui gravità sarà in rapporto, oltre che all'energia calorica incidente, al grado di pigmentazione, all'efficienza dei fenomeni locali di termoregolazione, alla capacità di penetrazione nei vari strati delle radiazioni incidenti. Laser di potenza notevolmente elevata possono danneggiare seriamente anche gli organi interni.

La grande varietà di lunghezze d'onda, energie e caratteristiche d'impulso dei laser e sistemi che includono laser, e delle applicazioni e dei modi di impiego di tali sistemi, rendono indispensabile, ai fini della sicurezza, il loro raggruppamento in categorie, o classi, di pericolosità. E' risultato molto utile pertanto l'introduzione di un nuovo parametro chiamato Limite di E-

missione Accettabile (LEA), che descrive i livelli di radiazione emergente da un sistema laser, la cui valutazione permette la collocazione dell'apparecchio nell'opportuna categoria di rischio. La determinazione del LEA deve essere effettuata nelle condizioni più sfavorevoli ai fini della sicurezza.

Si sono individuate 5 classi: 1, 2, 3A, 3B e 4, con indice di pericolosità crescente con il numero di classe:

- ⇒ Classe 1: in questa classe vengono raggruppati i laser cosiddetti intrinsecamente sicuri, poiché il livello di esposizione massima permesso non viene mai superato, o quei sistemi laser non pericolosi grazie alla loro progettazione ed ingegnerizzazione: involucri fissi e sicurezze intrinseche come ad esempio sistemi che bloccano definitivamente l'emissione in caso di guasto o di apertura involontaria o volontaria dell'apparato. I LEA per la classe 1 sono le condizioni di esposizione massima permessa più rigide e limitative per ciascuna lunghezza d'onda e durata di esposizione.
- ⇒ Classe 2: sono quelle sorgenti o sistemi che emettono radiazione nell'intervallo 400 e 700 nm (cioè nel visibile) a bassa potenza. Non sono intrinsecamente sicuri, ma la protezione dell'occhio è normalmente facilitata dal riflesso di ammiccamento. Bisogna evitare di guardare nel fascio.
- ⇒ Classe 3A: comprende i laser con potenze di uscita non inferiori a 5 mW. La protezione dell'occhio è facilitata dal riflesso di ammiccamento. Bisogna evitare di guardare nel fascio, né osservare direttamente con strumenti ottici.
- ⇒ Classe 3B: i livelli, sia per radiazione visibile che per quella non visibile, non devono superare i 500 mW. La visione diretta nel fascio è sempre pericolosa, mentre non è a rischio la visione di radiazioni non focalizzate, mediante riflessione diffusa.
- ⇒ Classe 4: sono i più potenti e pericolosi. La classe 4 comprende tutti quei sistemi che superano i livelli imposti alla classe 3B. Il loro uso richiede un'estrema prudenza. Sono pericolosi anche per riflessione diffusa. Essi possono causare danni a carico della cute e presentano anche un rischio di incendio. E' necessario evitare l'esposizione dell'occhio e della pelle alla radiazione diretta o diffusa

1.3 Comportamento del laser a contatto con i materiali

Quando una radiazione colpisce la superficie di un corpo reale (detto anche corpo grigio), essa è in parte assorbita in parte riflessa ed in parte trasmessa.

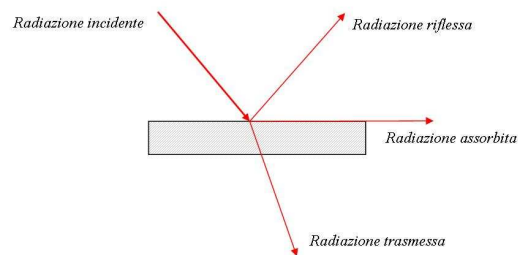


Figura 2. Comportamento di una radiazione luminosa a contatto con un corpo grigio.

Si possono definire i seguenti coefficienti adimensionali (variabili tra 0 ed 1), che misurano le interazioni tra energia e materia.

1. Assorbività (α): è il rapporto $\frac{E_A}{E_I}$ tra l'energia assorbita e quella incidente;
2. Riflettività (ρ): è il rapporto $\frac{E_R}{E_I}$ tra l'energia riflessa e quella incidente;
3. Trasmissività (τ): è il rapporto $\frac{E_T}{E_I}$ tra l'energia trasmessa e quella incidente.

Da notare è che lo stesso materiale ha un comportamento differente rispetto a lunghezze d'onda differenti. I coefficienti indicati in realtà sono funzione della lunghezza d'onda, ovvero:

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha(\lambda) \\ \rho &= \rho(\lambda) \\ \tau &= \tau(\lambda)\end{aligned}$$

Inoltre per il principio di conservazione dell'energia si ha che:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Questa dipendenza è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche dell'oggetto.

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

Come noto, se un fascio luminoso incide una superficie liscia di acciaio si forma un raggio riflesso ben definito, mentre se arriva su di un foglio di carta la luce viene riflessa più o meno in tutte le direzioni (riflessione diffusa). La differenza tra riflessione diffusa e speculare trova la sua ragione nel concetto di ruvidità delle superfici. Il comportamento geometrico della componente riflessa del raggio incidente è governato dal cosiddetto criterio di Rayleigh, per cui una superficie è considerata rugosa se:

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

dove:

Δh 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 e.m. rispetto alla verticale [rad].

Da notare il fatto che il concetto di rugosità di una superficie è funzione della lunghezza d'onda incidente la superficie stessa.

In generale le superfici perfettamente lisce riflettono in modo speculare, quelle perfettamente rugose si comportano come riflettori lambertiani, ovvero la direzione di riflessione è indipendente da quella di incidenza. Normalmente le superfici reali non si comportano né da superficie perfettamente speculare né da superficie perfettamente lambertiana ma si comportano in modo intermedio.

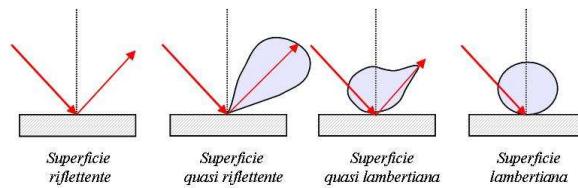


Figura 3. Comportamento riflettivo delle superfici

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.

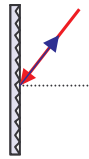


Figura 4. Comportamento riflettivo delle superfici retro-riflettenti

1.4 Il problema della divergenza del raggio laser

Come noto la luce laser ha la proprietà di essere:

- ⇒ monocromatica
- ⇒ coerente
- ⇒ direzionale

o, più semplicemente, è possibile definire il 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 in pratica 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.

In assenza del fenomeno di divergenza, un raggio laser incidente una qualsiasi superficie, avrebbe un'area di impatto pressoché puntiforme. La divergenza del raggio fa in modo tale 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.

1.5 I distanziometri laser.: principi di funzionamento

I distanziometri ad onde oggi presenti sul mercato possono essere classificati in due grandi categorie:

- ⇒ Strumenti che prevedono la misura di tempi trascorsi tra due impulsi o tra due treni d'onda (distanziometri ad impulsi)
- ⇒ Strumenti che prevedono la misura dello sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta (distanziometri a misura di fase).

A seconda dello strumento utilizzato si ottengono precisioni e distanze massime misurabili (portata) differenti. Gli strumenti laser scanner oggi sul mercato utilizzano in genere distanziometri laser che misurano il tempo di volo del segnale, ovvero distanziometri ad impulsi.

La precisione ottenibile con uno strumento a tempo di volo che utilizza un laser di classe 1 è al massimo di $4 \div 6$ mm a circa 100 m, valore che decresce in modo non significativo all'aumentare della distanza.

La distanza massima misurabile oggi è di circa $600 \div 800$ m nel caso dei distanziometri ad impulsi che non necessitano di prisma riflettente. Questa distanza cresce notevolmente se si utilizzano prismi riflettenti. Questa situazione però non si verifica mai nel caso dei sensori laser scanner in quanto questi sono concepiti per una digitalizzazione di oggetti e non per la misurazione delle coordinate di un solo punto ben materializzato (ad esempio da un prisma).

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:

$$2D = v\Delta t$$

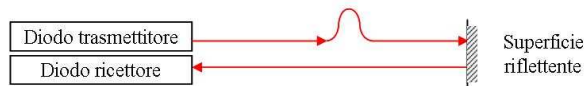


Figura 5. Misura di distanza ad impulso

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 $v = c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, costante nota con estrema precisione, si ha che Δt deve avere una precisione di 10^{-5} , cioè la sensibilità deve essere:

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

Ad esempio per una distanza $D = 3 \text{ m}$ si ha che il segnale torna dopo $\Delta t \cong 2D/v \cong 6/3 \cdot 10^8 \text{ s} \cong 20 \text{ ns}$ e la sensibilità dovrebbe essere $\delta\Delta t = 10^{-5} \cdot 20 \text{ ns} = 0,2 \text{ ps}$ cioè di circa $2 \cdot 10^{13} \text{ s}$ ottenibile solo con orologi atomici.

Nei distanziometri esiste un oscillatore molto stabile di precisione $p = 3 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ a frequenza $f \cong 14,985 \text{ MHz}$ pari a $\lambda = 20 \text{ m}$.

Il diodo viene attraversato per un tempo ristrettissimo, 12 ns , da una forte corrente di $20 \div 30 \text{ A}$ 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. Questo intervallo di tempo permette il calcolo di un valore approssimato della distanza con s.q.m pari a:

$$\sigma_D = p \cdot c = \pm 3 \cdot 10^{-8} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong \pm 9 \text{ m}$$

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.

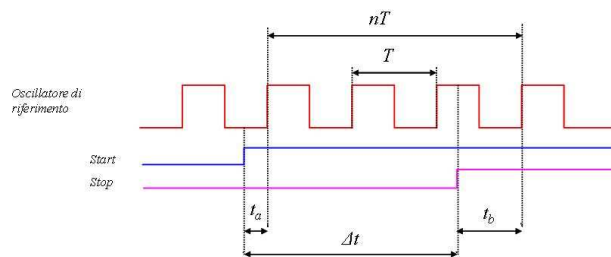


Figura 6. Misura del tempo trascorso

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) e 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, con una semplice proporzione, ricavare i tempi residui richiesti in funzione della tensione in essi raggiunte dal condensatore.

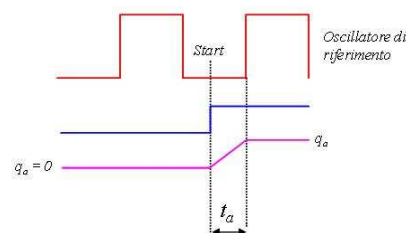


Figura 7. Misura del tempo t_a

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 questo segnale 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 "esterna" del tempo, cioè del 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 μ 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.

Distanziometri a misura di fase

Il funzionamento si basa sull'emissione di una radiazione ottica con lunghezza d'onda corrispondente all'infrarosso vicino ($\lambda = 0,78$ mm) che viene modulata e trasmessa verso un prisma retro riflettore; quest'ultimo riflette una parte dell'onda verso l'apparecchio ricevente che interpreta la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta. Questo sfasamento dipende dalla distanza esistente tra il distanziometro 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.

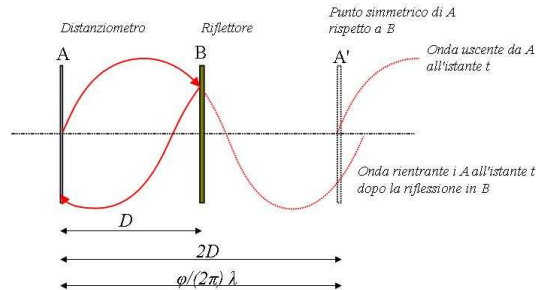


Figura 8. Principio della misura della distanza per differenza di fase (Caso con $D < \lambda/2$).

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

Per il generico istante t è possibile scrivere il valore dell'ampiezza dell'onda:

$$S_e = A \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_0)$$

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 di

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

$$S_r = A \cdot \text{sen}(\omega(t - \Delta t) + \varphi_0)$$

$$S_r = A \cdot \text{sen}(\omega t - \omega \Delta t + \varphi_0)$$

$$S_r = A \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi + \varphi_0)$$

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 e valutare, senza errore, il numero intero di mezze lunghezze d'onda. E' bene puntualizzare che con qualunque distanziometro ad onde la misura dello sfasamento $\Delta\varphi$ permette sempre e solo di valutare quella porzione di distanza che eccede il numero intero di mezze lunghezze d'onda in essa contenuto e che il numero n si può valutare con modalità diverse.

I problemi di misura consistono quindi nel ricavare lo sfasamento φ e l'ambiguità n.

1.6 I sensori laser scanner terrestri

I distanziometri laser oggi presenti sul mercato del rilevamento sono sempre più precisi ed affidabili e possono misurare la posizione di punti ad elevata velocità. L'unione di un distanziometro con queste caratteristiche ad un'insieme di apparati meccanici di alta precisione ha reso possibile la realizzazione dei sensori laser scanner. La meccanica dello strumento permette di materializzare una direzione di acquisizione mentre il distanziometro laser acquisisce una distanza lungo la direzione stessa. Il risultato dell'acquisizione è un insieme di punti sparsi nello spazio in modo più o meno regolare che comunemente viene chiamata "nuvola di punti". I laser scanner oggi presenti sul mercato sono molti ed ognuno di essi presenta caratteristiche differenti nel principio di acquisizione, nella precisione ottenibile, nella portata e nella velocità

di acquisizione. Nonostante le molteplici differenze tra di essi è possibile classificare i sensori laser in alcuni gruppi principali.

La prima classificazione che è possibile effettuare è quella che distingue gli strumenti a seconda del principio di acquisizione che utilizzano:

- ⇒ Laser scanner distanziometrici
- ⇒ Laser scanner triangolatori.

I laser scanner distanziometrici

I laser scanner distanziometrici possono facilmente essere paragonati alle stazioni totali topografiche. La misura della posizione tridimensionale del punto avviene infatti in coordinate sferiche. Per ogni punto acquisito sono misurati un angolo orizzontale (azimutale), un angolo verticale (zenitale) ed una distanza inclinata. Per questo motivo spesso i sistemi a scansione laser terrestri sono considerati quali stazioni totali ad elevata automazione.

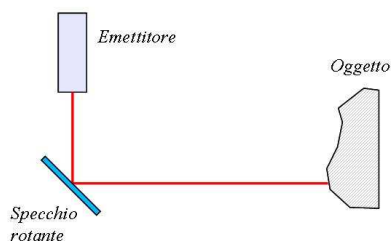


Figura 9. Schema di funzionamento di un laser scanner terrestre di tipo distanziometrico.

Esiste però una sostanziale differenza tra i rilevamenti topografici con stazione totale e le acquisizioni laser scanner. Quando si effettua un rilievo topografico classico sono misurate le coordinate di punti particolari appartenenti all'oggetto, che devono essere ben riconoscibili all'occhio e che definiscono in genere la sagoma dell'oggetto stesso, come ad esempio spigoli, fessure, ...

Nel caso di un rilevamento laser scanner invece non vi è alcuna possibilità di scegliere i punti da rilevare. E' possibile in genere definire solo l'area che si vuole acquisire e la densità di punti desiderata. Definiti questi parametri l'acquisizione è completamente automatica. Il risultato del rilevamento è una nuvola di punti molto densa ma con gli stessi 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 pt/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.

I laser scanner triangolatori

I laser scanner triangolatori sono strumenti che, per la misurazione della posizione di punti, utilizzano il principio dell'intersezione in avanti. Si tratta di strumenti di forma allungata o a tubo dotati di un diodo emettitore e di un diodo ricevitore 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.

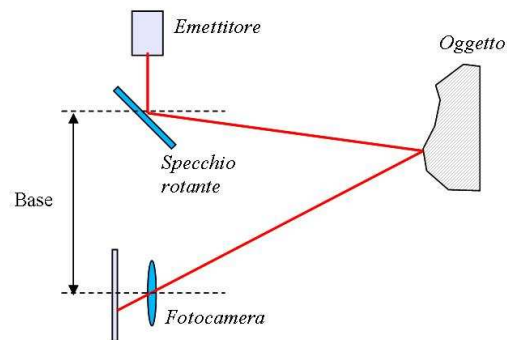


Figura 10. Schema di funzionamento di un laser scanner terrestre di tipo triangolatore.

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 dono 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). 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.

Classificazioni ulteriori dei laser scanner terrestri

I laser scanner possono anche essere classificati a seconda di altre caratteristiche che sono:

⇒ Posizionamento del sensore laser.

Possono essere distinti due tipi di laser differenti: laser statici e laser mobili.

Gli strumenti statici sono quelli generalmente impiegati nelle linee di controllo meccanico, per il monitoraggio di movimenti e deformazioni o per il rilevamento di alta precisione. In genere hanno una posizione fissa nel tempo e acquisiscono sempre una stessa scena. I laser scanner mobili, o trasportabili, sono quelli più utilizzati nel campo del rilevamento topografico. Si tratta di strumenti di dimensioni ridotte che sono posizionati su treppiedi e permettono di inquadrare la zona desiderata.

⇒ Portata del sensore laser

Si possono distinguere strumenti a piccola portata (< 1 m, in genere laser triangolatori con precisioni sub-millimetriche), strumenti a media portata (1 m ÷ 50 m, distanziometri-

ci o triangolatori con precisioni da 0.2 a 6 mm) e strumenti a lunga portata (50 m ÷ 1000 m, distanziometrici con precisioni da 5 mm a 2 cm)

Naturalmente non bisogna dimenticare che la portata di un laser è funzione del tipo di materiale colpito dal raggio ed, in particolar modo, dalla riflettività del materiale (ρ) alla lunghezza d'onda del laser. Maggiore è infatti la riflettività infatti maggiore sarà la portata ottenibile mentre minore è la riflettività (e quindi maggiore la parte di energia assorbita) minore sarà la portata.

Questo avviene semplicemente perché il raggio riflesso dalla superficie si propaga nell'atmosfera che non è altro che un corpo trasparente. Come tale ha la proprietà di assorbire, trasmettere e riflettere una qualsiasi radiazione elettromagnetica. Nonostante nei limiti di operabilità dei laser l'effetto di attenuazione del segnale laser sia abbastanza ridotto è facilmente dimostrabile da prove empiriche come l'effetto di attenuazione aumenti all'aumentare della distanza che si vuole rilevare.

Se la parte di raggio riflesso da una superficie è particolarmente debole questa si disperde velocemente nell'ambiente per cui la distanza massima rilevabile in questo caso diminuisce.

Finora sono state messe in evidenza le caratteristiche di precisione, portata e velocità nell'acquisizione per le differenti tipologie dei sensori laser.

Esistono però numerosi altri aspetti che devono essere considerati per stabilire la qualità di uno strumento laser scanner per il rilevamento di un particolare oggetto.

In particolare bisogna considerare¹:

- ⇒ velocità di acquisizione
- ⇒ risoluzione di scansione e divergenza del raggio laser;
- ⇒ portata nominale ed effettiva;
- ⇒ campo di misura;
- ⇒ acquisizione dell'intensità di segnale riflesso ricevuto (riflettività);
- ⇒ riconoscimento automatico di segnali;
- ⇒ acquisizione RGB (interna o attraverso apparecchi esterni);
- ⇒ autonomia operativa dello strumento;
- ⇒ maneggevolezza;
- ⇒ facilità d'uso e presenza di software di acquisizione e di gestione dei dati.

2 Principi di acquisizione

La prima impressione che si ha utilizzando un laser scanner di tipo terrestre è che l'acquisizione dei dati sia semplice e che non richieda alcun accorgimento particolare. Messo lo strumento

¹ F. Rinaudo (2003). La tecnica del laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche. Pubblicato nel volume F. Crosilla, R. Galetto. La Tecnica laser scannino. Teoria e applicazioni. (pp. 157-172). ISBN: 88-85137-27-X. UDINE: CISM (ITALY).

in stazione si effettua la scansione dell'oggetto desiderato e si ha disposizione il suo modello digitale sotto forma di nuvola di punti.

Questo modo di affrontare una acquisizione laser però non è del tutto corretto e, se utilizzato, può rendere la tecnica di acquisizione laser meno produttiva di quanto in realtà essa non sia.

Bisogna innanzitutto pensare al fatto che un rilevamento laser scanner è sempre effettuato per ottenere un prodotto finale (ad es. ortofoto, immagine solida, modello a colori georiferito, ...)

Nel procedimento per ottenere quanto desiderato la fase di acquisizione è solo il primo di una serie di passaggi ed in quanto tale la sua bontà si riflette in tutti i passaggi successivi. Se l'acquisizione avviene in modo arbitrario od errato il rischio è quello di non riuscire ad ottenere il risultato che ci si è preposti e quindi di dover ripetere, nel peggiore dei casi, le operazioni di rilievo (con costi e tempi aggiuntivi).

Per questo motivo è di fondamentale importanza, quando si vuole effettuare un rilevamento utilizzando un sensore laser scanner, progettare a priori le fasi di acquisizione dei dati e di progetto degli elementi necessari al supporto alle scansioni laser.

2.1 Progetto di acquisizione

Il progetto di una campagna di acquisizione laser può essere effettuato considerando i seguenti aspetti:

Tipo di laser utilizzato (precisioni, portata e campo di acquisizione).

È il primo degli aspetti da considerare quando si vuole effettuare un rilevamento laser scanner. Oggi il mercato propone strumenti dalle caratteristiche molto differenti. Esistono strumenti in grado di acquisire l'ambiente a loro circostante in quasi la sua totalità senza che vi sia alcuna necessità di spostare lo strumento, ed esistono strumenti in grado di acquisire scene di ampiezza limitata. Anche la portata, la precisione e la velocità di acquisizione dei punti sono in genere differenti da strumento a strumento.

Una così ampia gamma di laser scanner non consente di effettuare un discorso generale nell'organizzazione di un progetto laser scanner. A seconda del sensore utilizzato e delle sue caratteristiche operative, dei tempi a disposizione per l'esecuzione e dell'estensione del rilevamento è necessario progettare in modo ragionato le fasi di acquisizione.

Si evidenziano di seguito gli aspetti fondamentali da considerare all'atto di un progetto di acquisizione laser terrestre.

Soggetto che si vuole rilevare.

Importanza fondamentale nella redazione di un progetto di rilevamento laser scanner assume ovviamente il soggetto acquisito. Gli aspetti da tenere in conto sono:

La geometria dell'oggetto;

La dimensione dell'oggetto.

⇒ Geometria

Quando si parla di geometria di un oggetto bisogna obbligatoriamente legare questo concetto al concetto di scala. Se si "guarda" un qualsiasi oggetto da vicino, il dettaglio che se ne può cogliere è sicuramente più elevato di quanto se ne possa cogliere se l'oggetto è

“guardato” da più distante. Nel primo caso la visione che si ha dell'oggetto è una visione a scala più grande rispetto al secondo caso.

Per quanto riguarda i laser scanner il concetto è abbastanza simile. A parità di altre condizioni (passo di scansione, precisione, ...) se l'acquisizione è effettuata da più vicino, maggiore è il numero di punti acquisito sulla stessa porzione di oggetto.

Naturalmente la precisione con cui è possibile misurare la posizione di ogni punto non cambia, a meno di differenze trascurabili, se cambia la distanza di acquisizione, perché essa dipende dal tipo di laser utilizzato. Ciò che invece cambia è la capacità di acquisire, da parte del sensore, le piccole discontinuità presenti sull'oggetto. Se i punti acquisiti dal laser si trovano mediamente ad una distanza relativa più piccola della dimensione delle discontinuità, queste saranno visibili nel modello tridimensionale, mentre, se i punti acquisiti distano tra loro di un'entità che è superiore alla dimensione delle discontinuità presenti sull'oggetto, queste non saranno visibili nel modello 3D acquisito.

Facile intuire come, a seconda del tipo di dettaglio che si vuole acquisire, sia necessario progettare il passo di scansione e la distanza di acquisizione per ogni posizione di rilievo.

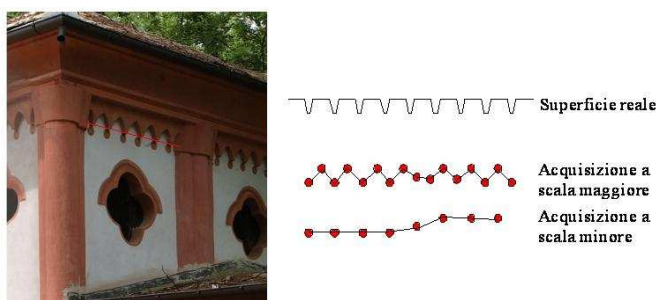


Figura 11. Esempio di acquisizioni (a parità di altre condizioni) effettuate a distanze di presa differenti (concetto di scala del rilievo).

Se l'intenzione invece è quella di acquisire un oggetto avente una semplice geometria (ad es. un soggetto formato da due piani) la distanza di presa non è l'aspetto più importante da considerare. In questo caso molto più importante è il concetto di densità di punti. Se l'oggetto è particolarmente semplice non è necessario effettuare scansioni ad elevata densità in quanto avremmo un'informazione eccessiva per la descrizione di entità particolarmente semplici. D'altro canto la densità di acquisizione non deve essere neppure portata a valori troppo ridotti, in quanto non sarebbero più possibili l'analisi ed il riconoscimento di entità geometriche in modo automatico all'interno della nuvola di punti acquisita.

⇒ Dimensione

Nel caso di un oggetto avente dimensioni ridotte una scansione può essere sufficiente a descrivere l'oggetto nella sua interezza. Questo non accade se l'oggetto che si vuole rilevare presenta dimensioni elevate. In questo caso è necessario effettuare più scansioni da punti di vista differenti dello stesso oggetto.

Naturalmente ogni scansione effettuata è espressa in un proprio sistema di riferimento locale. Nel momento in cui si decide di effettuare più di una scansione bisogna quindi prevedere a priori il metodo che si intende utilizzare nelle fasi di allineamento di due scansioni adiacenti e nell'eventuale successiva triangolazione nel caso di una serie di scansioni.

Per l'allineamento di scansioni esistono oggi in bibliografia diverse metodologie.

Uno tra i metodi oggi più utilizzati nel campo topografico è quello di posizionare alcuni adesivi riflettenti (marker) o entità geometriche di allineamento (ad es. sfere) nella zona di ricoprimento tra le due scansioni adiacenti.

Questi punti sono facilmente riconoscibili all'interno delle nuvole di punti e permettono quindi l'allineamento automatico di due scansioni. Naturalmente il numero di punti di legame (marker), la loro posizione e la loro dimensione deve essere stabilita a priori in funzione di dove verranno effettuate le due acquisizioni ed in funzione dell'oggetto rilevato.

Ambiente nel quale si trova il soggetto.

Ultimo aspetto da considerare nel progetto di acquisizione laser è l'ambiente nel quale si prevede di operare. Spesso è proprio l'ambiente nel quale si trova il soggetto di interesse che vincola in modo sostanziale le acquisizioni.

E' necessario capire quali sono le zone nelle quali è possibile posizionare il sensore e se, una volta posto in stazione, il sensore verrà disturbato durante le fasi di acquisizione dal passaggio di automezzi o (peggio) di persone.

Un progetto di acquisizione ben fatto consente di ottenere prodotti finali completi e corretti ma non è l'unico aspetto da considerare quando si parla di acquisizioni laser.

Uno degli aspetti di maggiore importanza quando si parla di acquisizione è il controllo in tempo reale dei dati. Se il controllo dei dati viene effettuato direttamente sul territorio è possibile infatti controllare che tutti gli oggetti che ci si era prefissati di acquisire sono stati digitalizzati. In caso contrario è possibile integrare direttamente i dati senza bisogno di tornare sul luogo del rilevamento in un secondo tempo. Questa possibilità in genere è fornita direttamente dal software di acquisizione e gestione dello strumento.