

# Rapporti tecnici

# INGV

Un esperimento per definire la  
reale risoluzione di un rilievo laser a  
scansione terrestre

# 173



## **Direttore**

Enzo Boschi

## **Editorial Board**

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)



# Rapporti tecnici INGV

## UN ESPERIMENTO PER DEFINIRE LA REALE RISOLUZIONE DI UN RILIEVO LASER A SCANSIONE TERRESTRE

Arianna Pesci<sup>1</sup> e Elena Bonali<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna)

<sup>2</sup>UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA (Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale)

# 173



## **Indice**

Introduzione	5
1. Caratteristiche strumentali	5
2. L'esperienza	7
3. Applicazione ad un caso reale	12
4. Conclusioni	12
Bibliografia	14



## Introduzione

I sistemi laser a scansione terrestre (TLS) sono ormai largamente diffusi ed utilizzati nelle più diverse applicazioni. Essi vengono impiegati, ad esempio, per rilievi ambientali su siti interessati da dissesto idrogeologico e franoso oppure per rilievi in aree vulcaniche e montane per l'analisi di stabilità e la stima delle deformazioni in atto e relative variazioni di volumi. Sono svariate anche le applicazioni in ambito civile per l'analisi della stabilità degli edifici mediante misure ad alta precisione o per lo studio del deterioramento dei monumenti nell'ambito dei beni culturali ecc.

Esistono varie tipologie di laser scanner e nelle applicazioni terrestri a media o lunga portata, cioè dove la strumentazione viene posizionata ad alcune decine o centinaia di metri (finanche al chilometro e oltre) dalla superficie da rilevare, la misura dei punti viene effettuata mediante il calcolo del tempo di volo impiegato da un impulso laser per percorrere due volte (andata e ritorno) il tragitto strumento-oggetto. La differenza tra un laser scanner ed un distanziometro laser (stazione totale) consiste nella capacità del primo non solo di misurare la distanza senza l'ausilio di speciali riflettori ma di potere, nell'ambito di ogni scansione, deflettere il fascio laser su una griglia angolare calibrata e quindi di inviare gli impulsi laser su tutte le direzioni a ricoprire di punti le superfici fisiche o in generale gli oggetti da scandire.

Ogni strumento ha determinate caratteristiche che lo rendono più o meno adatto alle varie applicazioni. Le caratteristiche più rilevanti che è fondamentale conoscere per programmare al meglio le campagne di misura sono: la massima portata, la frequenza di acquisizione, la precisione sulla singola misura, la divergenza del fascio laser e il minimo passo angolare di campionamento.

La precisione sulla singola misura è l'errore sulla misura della distanza calcolata per ogni impulso ed è generalmente compresa, a seconda dello strumento utilizzato, tra 1-2 mm (per un laser scanner architettonico) e circa 5 mm (per uno scanner topografico); la divergenza, linearmente dipendente dalla distanza, è invece responsabile della grandezza dello "spot", ovvero la porzione di terreno (o dell'oggetto) illuminata dal fascio laser; il passo angolare governa invece il passo di campionamento dei punti della griglia e cresce linearmente con la distanza. Questi tre fattori, in particolare, contribuiscono a determinare la risoluzione effettiva del rilievo laser, cioè la risoluzione della nuvola di punti che si ottiene in seguito ad una scansione, ovvero la capacità di distinguere due elementi differenti lungo le linee di scansione.

In che modo ed in quale misura essi entrino e si combinino nel complicato calcolo della risoluzione finale è un argomento molto discusso e ad oggi non chiaramente risolto.

Secondo alcuni autori il fattore dominante è la divergenza del fascio [Licthi and Jamtsho, 2006], per altri la risoluzione va di pari passo con la scelta del passo di campionamento [Iavarone, 2002; Optech, 2010] mentre per altri ancora ci sono delle complicate interazioni [Ling et al., 2008].

In questo lavoro viene mostrato un interessante esperimento effettuato utilizzando lo scanner ILRIS3D, in dotazione all'INGV, per determinare in modo empirico la massima risoluzione ottenibile in relazione alla distanza di stazione. I risultati principali sono in via di pubblicazione [Pesci et al., submitted] e in questo rapporto vengono illustrate con maggiore dettaglio e attenzione le fasi più interessanti dell'esperimento.

## 1. Caratteristiche strumentali

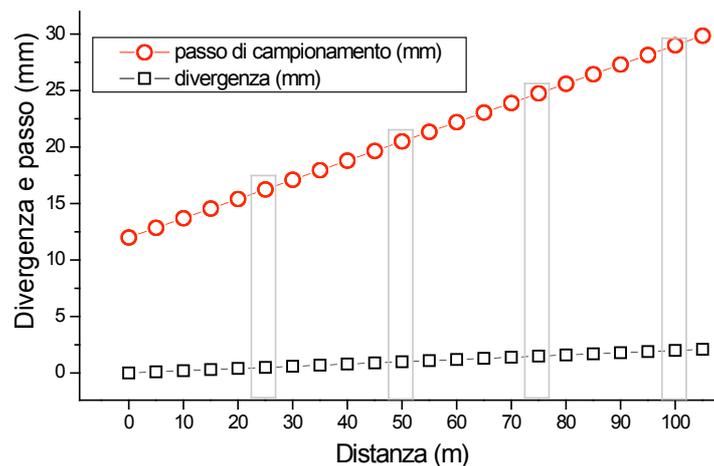
Il laser a scansione terrestre ILRIS3D (Optech) è uno strumento "very long range", specificatamente costruito per il rilievo ambientale, poiché capace di rilevare anche da distanze notevoli prossime al chilometro e oltre. Le caratteristiche note dello scanner utilizzato sono fornite in tabella 1, come indicate dalla casa costruttrice.

La divergenza ( $D$ ) ed il passo di campionamento ( $ss$ ) dipendono linearmente (o circa linearmente) dalla distanza di lavoro ( $r$ ). In particolare, sono fornite le equazioni lineari che si possono utilizzare per poter calcolare questi parametri per ogni distanza considerata:  $D(r) = 0.17 \cdot 10^{-3} \cdot r + 0.012$  e  $ss(r) = 0.02 \cdot 10^{-3} \cdot r$ . Il risultato di queste equazioni è da leggere in millimetri ma il valore della distanza ( $r$ ) è da inserire in metri. Ovviamente, ci riferiamo a quanto accade considerando una superficie piatta e pressoché ortogonale alla linea di scansione dello strumento, condizione cioè ottimale per evitare lo sparpagliamento dello spot (o spot spreading).

In figura 1 sono mostrati i valori della divergenza e del passo di campionamento in un intervallo di distanze comprese tra i 0 ed i 100 m con passo di 5 m. Nel grafico risulta evidente che le due quantità considerate hanno dimensione differente e differenti tassi di crescita con l'aumento della distanza.

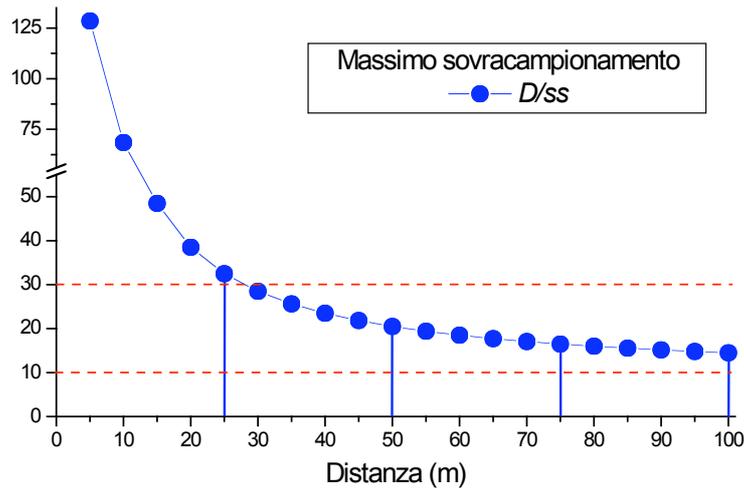
Parametro	Valore	Unità	Condizione
Lunghezza d'onda	1535 infrared)	nm	-
Classe	1M		-
Frequenza degli impulsi	2.5	kHz	-
Campo di vista	40 x 40	°	-
Portata minima	3	m	-
	1500	m	80% riflettività
Portata massima	800	m	20% riflettività
	350	m	4% riflettività
Divergenza	0.17	mrad	-
Spot diameter	20.5	mm	100 m distanza
Precisione singolo punto	7	mm	100 m distanza
Precisione modello	3	mm	100 m distanza
Minimo passo angolare	0.002 mrad	mrad	-
Minimo passo campionamento	2	mm	100 m distanza

**Tabella 1.** Le caratteristiche principali fornite dalla casa costruttrice e scaricabili dal sito ufficiale della Optech inc. ([www.Optech.ca](http://www.Optech.ca)).



**Figura 1.** I valori della divergenza e del passo di campionamento con la distanza. Sono evidenziate 4 situazioni (25, 50, 75 e 100 m) che saranno richiamate più avanti nel testo.

In figura 2 è mostrato il grafico del rapporto tra la grandezza dello spot ( $D$ ) ed il passo di campionamento. Appare evidente nel grafico che i valori differiscono almeno per un ordine di grandezza e che il loro rapporto, nell'intervallo 0 – 100 m, tende a raggiungere il valore di 10. Tra i 30 ed i 70 m, realistiche distanze di lavoro nel caso di rilievo architettonico, si passa per esempio da un rapporto di circa 30 a 17. Quello che fino ad ora si è chiamato rapporto  $D/s$  è di fatto il massimo sovra-campionamento ottenibile con lo scanner ILRIS3D nell'ambito di una singola scansione. Ciò significa che le stesse porzioni di superfici vengono osservate con più punti ed è quindi presumibile che un maggior numero di misure riferite agli stessi elementi permetta di ottenere maggiori precisioni.



**Figura 2.** Massimo valore ottenibile del rapporto tra la divergenza ed il passo di campionamento con la distanza. In figura sono evidenziati i valori relativi ai 25, 50, 75 e 100 m poiché su tali posizioni, nel seguito, verranno effettuate le scansioni dell’esperimento.

La descrizione un po’ estesa delle caratteristiche strumentali in termini di divergenza ( $D$ ) e passo di campionamento ( $ss$ ) è in questo caso necessaria per focalizzare bene quelli che sono i dati certi legati alle misure che saranno effettuate.

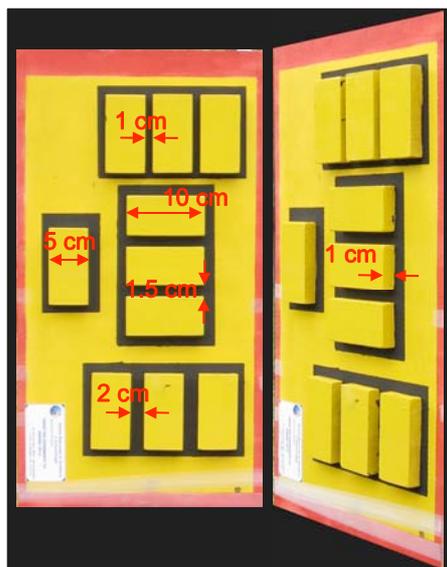
## 2. L’esperimento

Nel maggio 2010 in concomitanza con uno studio relativo allo stato di salute delle facciate dei palazzi bolognesi del XVI secolo, si è svolto un esperimento atto a capire quale fosse la reale risoluzione ottenibile con lo scanner ILRIS3D e quale fosse la miglior scelta del passo di campionamento per effettuare rilievi veloci senza perdere dettaglio. Al fine di comprendere in maniera definitiva cosa ci si potesse aspettare da uno strumento generalmente utilizzato per applicazioni very long range, ovvero con distanze nettamente superiori a 100 m e generalmente comprese tra i 500 m ed 1 km, è stato costruito un target speciale, composto da un pannello in legno su cui sono state applicate 9 mattonelle di lato 5 x 10 cm e di 1 cm di profondità a formare 3 file di oggetti paralleli. La differenza tra le 3 file consisteva nelle differenti fughe tra le mattonelle, scelte come 1 cm, 1.5 cm e 2 cm (figura 3).

Il target è stato fissato in posizione pressoché verticale su un supporto (nel nostro caso il box del laser scanner) e rilevato da 4 distanze di riferimento cioè 25, 50, 75 e 100 m (figura 4).

È qui importante sottolineare che in questa fase dell’esperimento si è scelto di valutare l’efficienza dello scanner sulle brevi distanze, sia per testarlo nelle applicazioni architettoniche per eventuali usi di precisione su edifici lesionati sia per definire una procedura chiara ed esportabile con la quale valutarne realisticamente la risoluzione.

Su ogni posizione sono state effettuate numerose scansioni selezionando la zona da scandire e scegliendo differenti passi di campionamento, dal più stretto al più largo al fine di capire quali nuvole di punti avrebbero in seguito restituito una immagine fedele all’originale.



**Figura 3.** Il target. I mattoni appositamente creati delle dimensioni desiderate sono incollati e spazati tra loro di 1, 1.5 e 2 cm rispettivamente. Il piano e le componenti in legno sono stati pitturati in giallo per una migliore resa e un contorno nero è stato disegnato per meglio identificare i dettagli del target nelle nuvole di punti.



**Figura 4.** Fotografia del rilievo dalla prima posizione di 25 m. La posizione è stata misurata mediante cordella metrica e lo scanner è stato orientato per essere il più normale possibile al target.

Alle distanze di riferimento, le caratteristiche del rilievo ( $D$ ,  $ss$ ) sono elencate in tabella 2 e nell'ultima colonna è riportato il rapporto  $D/ss$ . Risulta evidente che la divergenza, che ricordiamo indica il diametro dello spot, è sempre maggiore di 1 cm, cioè del dettaglio più piccolo contenuto nel target.

Le scansioni sono state effettuate dalle 4 posizioni utilizzando differenti strategie di rilievo, scegliendo cioè varie possibilità di sovracampionamento dei dati, andando cioè ad agire direttamente sul rapporto  $D/ss$ . Su ogni posizione, infatti, sono state effettuate numerose scansioni selezionando la zona da scandire e scegliendo differenti passi di campionamento, dal più stretto al più largo al fine di capire quali nuvole di punti avrebbero in seguito restituito una immagine fedele all'originale. Chiaramente, non è possibile (a meno di utilizzare uno strumento differente) cambiare la grandezza dello spot, ma è solo consentito regolare il passo angolare.

Nel corso dell'esperimento, la scelta è stata di non operare esasperando l'acquisizione ma di utilizzare simili passi di campionamento. In termini semplici, nonostante il minimo ss possibile dalla distanza di 25 m fosse 0.5 mm, si è scelto di iniziare da 1 mm poiché il rapporto 10/1 è la tendenza di  $D/ss$  al crescere della distanza e poiché una scelta troppo estrema del passo di campionamento determina tempi di rilievo non convenienti e proibitivi per ovvi motivi logistici.

r (m)	ss (mm)	D (mm)	D/ss ( )
	$D(r) = 0.17 \cdot 10^{-3} \cdot r + 0.012$	$ss(r) = 0.02 \cdot 10^{-3} \cdot r$	
25	0.5	16.25	32.5
50	1	20.5	20.5
75	1.5	24.75	16.5
100	2	29	14.5

**Tabella 2.** Caratteristiche strumentali alle distanze di riferimento (25, 50, 75 e 100 m).

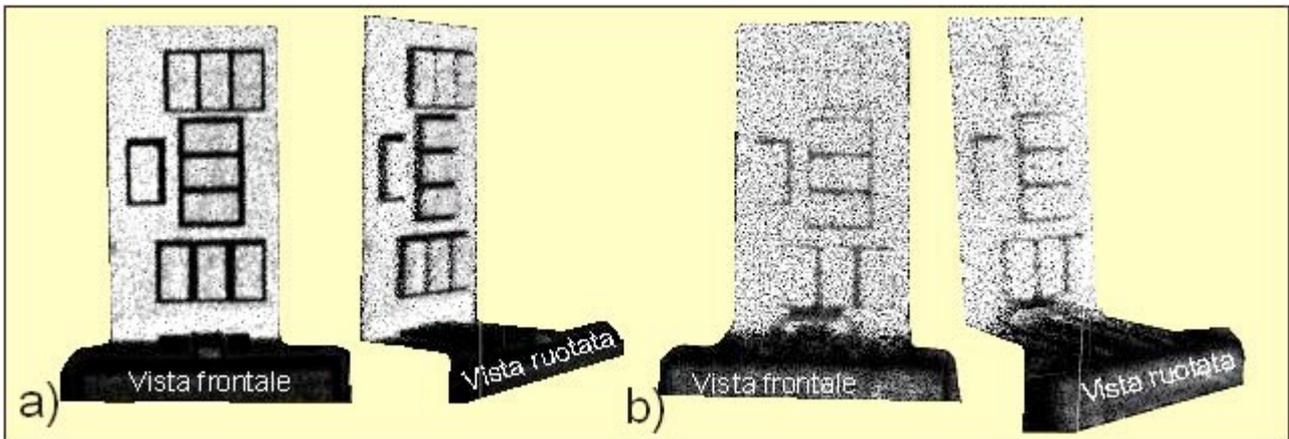
r (m)	D (mm)	ss (mm) e D/ss ( )																		
25	16.25	1	-	2	-	3	-	4	-	5	-	6	-	7	-	8	-	9	-	10
		16.3	-	8.1	-	5.4	-	4.1	-	3.3	-	2.7	-	2.3	-	2.0	-	1.8	-	1.6
50	20.5	1	-	2	-	3	-	4	-	5	-	6	-	7	-	8	-	9	-	10
		20.5	-	10.3	-	6.8	-	5.1	-	4.1	-	3.4	-	2.9	-	2.6	-	2.3	-	2.1
75	24.75	-	1.5	-	-	3	-	-	4.5	-	-	6	-	-	7.5	-	-	9	-	-
		-	16.5	-	-	8.3	-	-	5.5	-	-	4.1	-	-	3.3	-	-	2.8	-	-
100	29	-	-	2	-	-	-	4	-	-	-	6	-	-	-	8	-	-	-	10
		-	-	14.5	-	-	-	7.3	-	-	-	4.8	-	-	-	3.6	-	-	-	2.9

**Tabella 3.** Dettagli delle scansioni effettuate dalle 4 distanze. Per ogni scansione è riportato il passo di campionamento (ss) ed il rapporto  $D/ss$ .

In tutto sono quindi state effettuate 32 scansioni: 10 dai 25 m, 10 dai 50 m, 7 dai 75 m e 5 dai 100 m. Le 32 scansioni sono state ripulite eliminando tutto ciò di rilevato esternamente al target con le classiche procedure di editing ed esaminate per verificare se i dettagli del target fossero o meno rilevati. In figura 5 (a, b) è riportata la scansione effettuata dalla distanza di 50 m con un passo di campionamento di 2 mm. È mostrata la nuvola di punti "editata", cioè ripulita da tutti i punti rilevati al di fuori del bersaglio di interesse, dalla linea di vista frontale dello strumento e ruotata. In entrambe le situazioni si riescono a distinguere chiaramente tutte le mattonelle e le fughe tra esse. È interessante notare che a 50 m lo spot ha un diametro di 20.5 mm, pari a circa il doppio del dettaglio minimo contenuto nel target (fuga di 1 cm).

Per questo motivo, appare subito chiaro e confermato dal dato sperimentale che non sarebbe corretto assumere come risoluzione della nuvola di punti o più in generale come risoluzione di una scansione laser, il valore della divergenza. Infatti, se così fosse, a 50 m non sarebbe possibile distinguere dettagli più piccoli di 20.5 mm, cosa che invece è provata dalla semplice osservazione della nuvola di punti.

Nello stesso modo, osservando la scansione effettuata da una distanza di 100 m con un passo di 2 mm, è evidente come non sia visibile il dettaglio di 1 cm e come non siano quindi osservate le fughe della prima fila di mattonelle; questo conferma quindi che la risoluzione non può nemmeno essere assunta come il passo di campionamento. Se così fosse, infatti, la semplice e diretta osservazione della nuvola di punti, ci permetterebbe di osservare le fughe di 1 cm tra le mattonelle, ma ciò non accade.



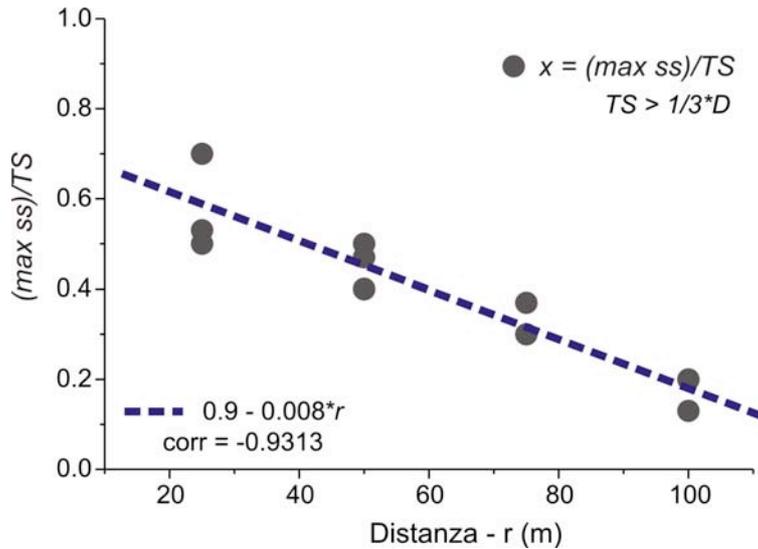
**Figura 5.** a) La nuvola di punti relativa a 50 m di distanza e rilevata con un campionamento di 2 mm; b) la nuvola di punti relativa a 100 m di distanza e eseguita con un campionamento di 2 mm.

In tabella 4 sono riportati i risultati qualitativi dell'esperimento per tutti i casi considerati, sottolineando le situazioni critiche con il colore rosso. Per situazioni critiche si intendono quelle in cui dettagli si vedono ma sono comprensibilmente affetti da rumore e non sufficienti per considerare la prova superata. In questo modo si sono individuati, per tutti i casi in esame, i passi di campionamento sufficienti a garantire l'osservazione dei particolari (*TS*) artificialmente inseriti sul target, quali le fughe tra mattonella e mattonella. In tabella sono indicati i passi di campionamento più grandi che permettono comunque di ottenere la risoluzione necessaria.

r (m)	TS (mm)	ss (mm)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	10	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	10	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	15	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
75		1.5	3	4.5	6	7.5	9				
	10	1	1	1	0	0	0				
	15	1	1	1	1	1	0	0			
	20	1	1	1	1	1	1	0			
100		2	4	6	8	10					
	10	0	0	0	0	0					
	15	1	1	1	1	1					
	20	1	1	1	1	1	1	0			

**Tabella 4.** Risultati qualitativi. 1 = prova superata; 1 = prova quasi superata; 0 = prova non superata.

Allo scopo di utilizzare tutti i dati ed i risultati ottenuti per un esame completo del problema, in termini di risoluzione, è stata definita una variabile  $x$  come  $(max\ ss)/TS$ , in relazione alla grandezza del particolare da rilevare ed al massimo passo di campionamento utile al fine della sua individuazione nella nuvola di punti. La variabile  $x$ , rappresenta quindi il rapporto diretto tra il passo di campionamento sufficiente ad osservare un particolare di taglia  $TS$ . In figura 6 sono plottati i valori delle  $x(r)$  ottenute dall'esperimento, i parametri della retta che al meglio li rappresenta, ottenuti mediante una semplice interpolazione lineare ed al coefficiente di correlazione. Nell'equazione  $x(r) = 0.9 - 0.008 \cdot r(m)$  è implicitamente contenuta anche l'informazione sulle dimensioni dello spot ( $D(r) = 0.17 \cdot 10^{-3} \cdot r + 0.012$ ) in quanto linearmente correlato ad  $r$ .



**Figura 6.** Grafico di  $x(r)$  e interpolazione lineare.

Se l'equazione empirica ed i parametri calcolati sono rappresentativi delle caratteristiche di risoluzione per un rilievo eseguito negli intervalli spaziali considerati, allora è possibile invertire l'equazione e ragionare a ritroso, creando quindi delle tabelle utili alla pianificazione della campagna di misura per ottimizzare i tempi di lavoro e per avere un'idea abbastanza precisa sul massimo dettaglio rilevabile con lo scanner ILRIS3D.

Scegliendo quindi un valore di riferimento per il dettaglio richiesto e per la distanza di lavoro, si può calcolare:  $\max ss = TS \cdot (0.9 - 0.008 \cdot r(m))$ . In tabella 5 è mostrato un caso in cui sia richiesta una risoluzione di 7 mm. La tabella mostra come non sia possibile pensare di effettuare un rilievo ad una distanza superiore ai 50 m e che, in questo caso, sia possibile utilizzare un passo di campionamento di 3.5 mm senza rischiare di compromettere il rilievo. In base al rapporto tra il massimo ed il minimo passo di campionamento ( $\max ss / \min ss = 4$  a 50 m), è possibile apprezzare (nello stesso campo di scansione) una riduzione sensibile di punti acquisiti. Infatti, se nel caso in cui si decida di sfruttare il massimo sovracampionamento si acquisiscono  $n^2$  punti, utilizzando un passo di campionamento 4 volte più grande, si ottengono  $(n/4)^2$  punti, con guadagno di tempo e di memoria.

I valori riportati nell'ultima colonna sono utilizzati come limite per il metodo proposto; da una attenta osservazione delle scansioni è emerso infatti che non è mai possibile osservare un dettaglio le cui dimensioni siano più piccole di 1/3 la divergenza (alle distanze considerate).

$r$ (m)	$D$ (mm)	$\min ss$ (mm)	$\max ss$ (mm)	$\max ss / \min ss$ ( )	$TS$ (mm)	$1/3 D$ (mm)
20.0	15.40	0.40	5.2	13	7	5.1
30.0	17.10	0.60	4.6	8		5.7
40.0	18.80	0.80	4.1	5		6.3
50.0	20.50	1.00	<b>3.5</b>	4		6.8
60.0	22.20	1.20	2.9	2		7.4
70.0	23.90	1.40	2.4	2		8.0
80.0	25.60	1.60	1.8	1		8.5
90.0	27.30	1.80	1.3	1		9.1
100.0	29.00	2.00	0.7	-		9.7

**Tabella 5.** Calcolo dei massimi spot spacing ( $\max ss$ ) accettabili al fine di osservare alla risoluzione di almeno 7 mm.

### 3. Applicazione ad un caso reale

L'efficacia del metodo è stata verificata nel corso del rilievo di una abitazione civile nelle vicinanze della Sezione INGV di Bologna. In particolare, è stato rilevato il prospetto in mattoni faccia-vista caratterizzato da fughe di circa 10 mm, misurate manualmente in modo diretto sulla parete con l'ausilio di un semplice righello.

La scansione è stata effettuata da una distanza di circa 35 m in base alla quale, secondo la formula empirica precedentemente calcolata, il massimo valore di campionamento accettabile per osservare le fughe non può superare 6.2 mm, mentre i possibili passi di campionamento sono multipli di 0.7 mm (a 35 m). Quindi il valore reale multiplo di 0.7 mm che più si avvicina (senza superare) a 6.2 mm risulta essere 5.6 mm. Per questo motivo, 5.6 mm è il valore migliore utilizzabile come passo di campionamento per rilevare in maniera veloce ed efficiente una superficie e per essere in grado di individuare dettagli di 1 cm.

Partendo da queste considerazioni che si sono potute ottenere grazie all'uso della relazione empiricamente determinata, in figura 8 è mostrata la parete in esame ed i particolari delle scansioni effettuate con passo di campionamento di: 1.4 mm, 5.6 mm e 7.6 mm. Solo nei primi due casi, in base alle informazioni precedentemente ottenute, ci si aspetta di osservare chiaramente le fughe di 1 cm. I risultati delle osservazioni, mostrati in figura 8, confermano le ipotesi di partenza. Infatti, la nuvola di punti rilevata con un passo di 7.6 mm non permette di osservare in modo chiaro le fughe tra i mattoni, mostrando solo alcune tracce non troppo delineate e precise.



Figura 8. Applicazione su parete reale.

### 4. Conclusioni

La risoluzione reale di un laser scanner, cioè la capacità di distinguere due elementi adiacenti di determinata grandezza lungo le linee di scansione, dipende ovviamente dalle caratteristiche dello strumento, specialmente in termini di divergenza del raggio laser e di passo di campionamento.

L'esperimento ha permesso di definire una relazione empirica tra passo di campionamento, risoluzione richiesta e distanza di lavoro nell'ambito dell'utilizzo dello scanner ILRIS3D.

In particolare, ammesso un limite inferiore pari ad  $D/3$ , e cioè assumendo che non sia possibile distinguere elementi di tale dimensione o al di sotto di essa, si è ottenuta la relazione lineare:

$\max ss = TS \cdot (0.9 - 0.008 \cdot r(m))$  in cui  $ss$  è il passo di campionamento,  $\max ss$  è la massima dimensione del passo di campionamento ancora efficace nell'osservazione di un dettaglio TS ed  $r$  è la distanza tra lo strumento e la superficie osservata. I risultati si riferiscono alle distanze di lavoro comprese tra i 25 m ed i 100 m, ma si prevede di ampliare l'esperimento mediante l'utilizzo di altri target (di dimensioni maggiori) per coprire la distanza di lavoro tra i 100 m ed 1 km.

La conoscenza della risoluzione ottenibile ad una determinata distanza e soprattutto, la conoscenza del massimo passo di campionamento accettabile al fine di ottenere il dettaglio richiesto nella nuvola di punti, permette sia di pianificare delle efficaci campagne di misura, che di ridurre i tempi necessari al rilievo, con grande risparmio di tempo e lavoro.

## **Bibliografia**

Iavarone, A. (2002). Laser scanner fundamentals. Professional Surveyor, 22. Available online at: <http://www.profsurv.com/magazine/article.aspx?i=949> (accessed 20 September 2010).

Lichti, D.D. And Jamtsho, S. (2006). Angular resolution of terrestrial laser scanners. The Photogrammetric Record, 21 (114), pp. 141-160.

Ling, Z., Yuqing, M. And Ruoming, S. (2008). Study on resolution of laser scanning point cloud. In Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 6-11 July 2008, Boston, MA, vol. 2, pp. 1136-1139 (Piscataway, NJ: IEEE).

Optech (2010). ILRIS 3D laser scanner description. Available online at: <http://www.optech.ca/prodilris.htm> (accessed: 20 September 2010).

Pesci, A., Teza, G., Bonali, E. (2010). Terrestrial laser scanner resolution: numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization. Remote Sensing, submitted.

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2011 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**