

ANALISI DELLE PRECISIONI DI MISURA SU TARGET RETRO-RIFLETTENTI CON LASER SCANNING TERRESTRE

Mario ALBA, Marco SCAIONI

Politecnico di Milano, DIAR, Polo Regionale di Lecco, via M. d'Oggiono 18/a, 23900 Lecco, Italy
{mario.alba, marco.scaioni}@polimi.it

Sommario

In diverse applicazioni di monitoraggio effettuate con laser scanning terrestre (TLS) l'utilizzo di target retro-riflettenti ha portato ad alcuni problemi nella georeferenziazione. Per questo motivo sono stati effettuati diversi test sui target retro-riflettenti, tramite l'utilizzo del laser scanner RIEGL LMS-Z420i, al fine di valutare la precisione di misura in funzione della distanza e dell'angolo di incidenza. In seguito sono stati applicati differenti algoritmi per la determinazione del centro dei target, alcuni già presenti in letteratura ed altri proposti per la prima volta. I risultati della sperimentazione hanno evidenziato un'ottima ripetitività nella misura dei target ma anche la presenza di un errore sistematico in range variabile in funzione della distanza dal TLS e dall'angolo di incidenza con cui il raggio laser colpisce il target. Nell'articolo vengono proposti e validati due diversi metodi per correggere questo errore.

Abstract

Experience in applications of terrestrial laser scanning (TLS) for deformation monitoring of concrete structures have shown the need of further exhaustive study about the quality of retro-reflecting target measurement. Here some tests carried out by means of a RIEGL LMS-Z420i laser scanner are reported. In addition, several algorithms for automatic retro-reflecting target measurement have been applied, and new ones proposed. Results obtained from lab experiments have revealed a good repeatability on target measurement, while the accuracy is highly affected by a bias on the measured range. This mainly depends on the distance of the target from TLS, and on the angle of incidence of laser beam. In order to compensate for this error, two approaches are presented and validated in the paper.

1. Introduzione

Negli ultimi anni è rapidamente cresciuto l'interesse per applicazioni di monitoraggio delle deformazioni effettuate con strumentazione *Laser Scanning Terrestre* (TLS), motivato dal fatto che questa tecnica permette di ottenere informazioni sulle deformazioni di intere superfici e non solo di pochi punti come avviene con i tradizionali strumenti per il monitoraggio strutturale. Le caratteristiche che un rilievo finalizzato a questo tipo di applicazione deve avere sono: una elevata precisione di misura, un'alta densità di punti misurati sulla superficie e un'accurata georeferenziazione delle scansioni indispensabile per poter valutare a differenti epoche le deformazioni dell'oggetto del rilievo. In letteratura vengono proposti differenti metodi per lo studio delle deformazioni che sfruttano la ridondanza delle osservazioni per ridurre l'effetto del rumore di misura. Lindembergh & Pfeifer, (2005) sfruttano un approccio basato sull'utilizzo di un numero elevato di piccoli piani (o di curve regolari) per interpolare localmente la nuvola di punti. Nel caso in cui l'oggetto è di forma regolare si preferisce interpolare l'intera superficie sfruttando equazioni geometriche note (Schneider, 2006). Infine nel caso si debbano confrontare delle superfici irregolari è possibile utilizzare algoritmi *3-D surface L.S. matching* per misurare le deformazioni locali (Montserrat & Crosetto, 2008). Esistono numerose altre problematiche che riguardano il monitoraggio con TLS ma tra queste l'aspetto di maggior importanza

è senz'altro quello della registrazione delle scansioni in un sistema di riferimento esterno ritenuto stabile nel tempo. In generale la soluzione più utilizzata per definire il sistema di riferimento comune alle differenti epoche è quello di utilizzare target, e tra questi quelli costituiti da materiale *retro-riflettente* sono tra i più impiegati.

Durante alcuni test sperimentali per il monitoraggio di grandi strutture civili è nata l'esigenza di effettuare ulteriori studi inerenti la precisione di misura su questi tipi di target. Tale fattore influenza notevolmente la qualità della georeferenziazione che risulta di primaria importanza per poter comparare scansioni acquisite a differenze epoche. In letteratura questo tema è stato poco approfondito e per tale ragione è stata indagata questa tematica effettuando alcuni test sperimentali.

2. Problematiche relative all'utilizzo di target retro-riflettenti

L'uso dei target retro-riflettenti (RRT) per la registrazione delle scansioni è attualmente molto diffuso, in quanto il loro riconoscimento automatico e la misura sono implementati in molti TLS e nei relativi programmi di acquisizione e controllo. Spesso le strategie e gli algoritmi di misura utilizzati per il calcolo delle coordinate dei RRT adottati dai differenti strumenti non sono noti agli utilizzatori. Inoltre la forma e la tipologia dei target impiegati dalle diverse case costruttrici non è standardizzata, ed alcune tipologie possono essere utilizzate solo per una specifica tipologia di TLS. Per queste ragioni risulta impossibile stabilire un metodo comune per valutare la precisione di misura dei target utilizzando strumentazione differente. D'altro canto è possibile individuare dei fattori comuni che influenzano la precisione di misura per tutti i laser a tempo di volo:

- la divergenza del raggio laser;
- la risoluzione angolare massima;
- l'angolo di incidenza tra raggio laser e superficie del target;
- intensità di risposta del laser.

In questo articolo è stata analizzata la precisione di misura dei RRT misurati con il laser scanner Riegl LMS-Z420i ed il software di acquisizione Riscan Pro. Le specifiche tecniche ad essi relative sono presenti sul sito del produttore, mentre alcuni dettagli sulla strategia impiegata dello strumento per la scansione dei target sono riportati in Alba *et al.*, 2008.

3. Descrizione dei test sperimentali

3.1 Test 1: misura su grandi distanze

Questo test è stato effettuato per valutare la precisione di misura dei target su distanze tra sensore e target comprese tra i 10÷300 m. In particolare è stata analizzata l'influenza dell'angolo di incidenza del raggio laser sul target e la dimensione della sua impronta al fine di valutare la più idonea grandezza e tipologia del target da utilizzare in funzione della distanza. Le misure sono state effettuate all'esterno a causa delle cospicue distanze in gioco. Durante questo test è stato utilizzato un pannello di 1x2 m sul quale sono stati incollati 11 target di differente forma e misura ricoperti di carta adesiva retro-riflettente. Questi possono essere raggruppati in 4 categorie:

1. *Fogli quadrati* con lato 4, 5 e 6 cm;
2. *Fogli circolari* con 10, 20 e 30 cm di diametro;
3. *Disco di alluminio* con parte riflettente di 10 cm e spessore di 0,5cm;
4. *Disco di alluminio* imbrunito con parte riflettente di 3,5 cm e spessore di 0,3cm.

Le coordinate del pannello che definiscono il sistema di riferimento terreno (GRS) sono state misurate con una stazione totale Leica TCA2003 con uno s.q.m. inferiore a $\pm 0,4$ mm. Durante il test il laser scanner è rimasto fisso mentre il pannello è stato mosso a differenti distanze (10, 50, 100, 200 e 300 m). Per ogni passo il pannello è stato ruotato di 30° rispetto al piano verticale (configurazione 'v30') e di 30° e 45° rispetto a quello orizzontale ('h30' e 'h45'). Il pannello è stato scansionato alla massima risoluzione ed i target individuati e misurati attraverso il SW Riscan Pro.

3.2 Test 2: misura su brevi distanze

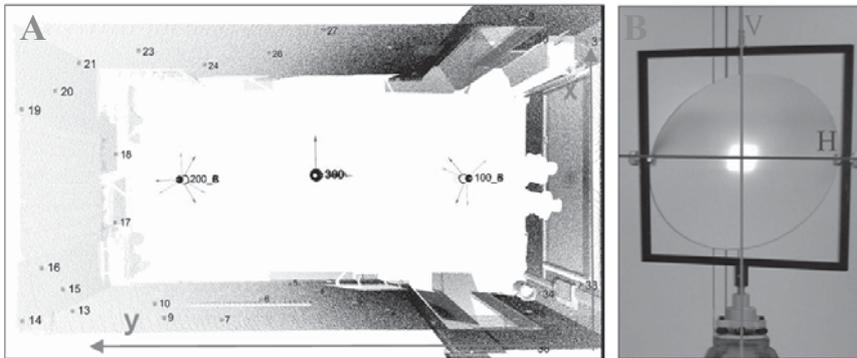
Un secondo gruppo di test è stato eseguito per valutare la presenza di eventuali errori sistematici nella determinazione del centro dei RRT in funzione della distanza (r) o degli angoli azimutale (φ) e zenitale (θ). In un'aula di dimensioni 12x6x3 m sono stati incollati sui muri 38 target di forma quadrata con lato di 5 cm. Il loro centro è stato misurato con una stazione totale TCRA 1200 con s.q.m. inferiore a ± 1 mm. Per distinguere tra loro le due differenti prove eseguite sono state denominate come segue:

- *Ex2.1*: il TLS è stato posizionato su una stazione in un punto centrale della stanza (n. 300 in Fig. 1) e sono state eseguite 9 differenti scansioni al fine di verificare la ripetibilità delle misure;
- *Ex2.2*: il TLS è stato posizionato su 2 stazioni (n. 100 e 200 in Fig. 1) e da ciascuna di queste sono state eseguite tre differenti scansioni con lo strumento ruotato attorno all'asse orizzontale di 120° .

3.3 Test 3: misure utilizzate per la modellazione

Un target di dimensione quadrata di lato 5cm è stato incollato al centro di un disco circolare che può ruotare su ciascuno dei suoi assi senza modificarne la posizione del centro (Fig. 2). Il campo di misura è stato scelto sulla base della strategia utilizzata da SW Riscan Pro per scansionare il target (vedi Alba *et al.*, 2008). Anche in tal caso per distinguere due differenti prove queste sono state nominate come segue:

- *Ex3.1*: il target è stato acquisito a distanze intervallate di 30 cm tra 4÷20m e di 1 m tra 20÷35; il target è stato sempre disposto in posizione frontale rispetto allo scanner.



- *Ex3.2*: il target posto a tre differenti distanze 9, 13.5 e 18 m è stato ruotato a step di 10° da $+70^\circ$ a -70° rispetto sia all'asse verticale che orizzontale del target.

Fig. 1. Aula utilizzata nel Test 2 con stazioni e target (A), target utilizzato nel Test 3 (B)

4. Analisi dei risultati

4.1 Algoritmi per la misura automatica dei RRT

Dopo la scansione del target ad alta risoluzione il software di acquisizione calcola in modo automatico il centro dello stesso applicando un algoritmo che spesso, per i SW commerciali, risulta incognito.

In letteratura vengono proposti diversi algoritmi. Litchi *et al.* (2000) suggerisce tre diversi metodi: il primo definisce il centro (*maxrad*) di ciascun target come la posizione del punto con la massima intensità, il secondo (*maxrad4*) come la posizione media dei 4 ritorni di maggiore intensità mentre l'ultimo algoritmo (*radcent*) definisce il centro come la media di tutti i ritorni. In Valanis & Tsakiri (2004) vengono presentati e sperimentati altri algoritmi tutti basati su tecniche di *fuzzy clustering*. Durante i nostri test si utilizzerà un metodo simile a quello chiamato "*fuzzypos*" anche se adattato al

tipo di RRT utilizzato dallo scanner Riegl LMS-Z420i. Da un'analisi dei dati elaborati con tale metodo si è notato che i punti del target aventi maggiore intensità risultano traslati rispetto ai punti esterni allo stesso ed aventi intensità minore, ipotesi confermata anche dai test sperimentali che verranno descritti nel paragrafo 4.2.1.

Oltre ai sopra citati metodi è stato progettato un nuovo algoritmo (*intersect*) con l'obiettivo di ridurre l'errore di offset. Questo, come primo passo, utilizza la *cluster analysis* per suddividere i punti in tre classi. Successivamente, un piano interpolante π stimato viene con il metodo RANSAC utilizzando la classe di minore intensità, cioè quella non appartenente al RRT. Infine viene calcolato il baricentro G dei punti della classe con maggiore intensità ed il centro dei target T_c viene definito come intersezione tra il piano π ed il vettore congiungente il punto G con il centro del sistema di riferimento intrinseco (IRS) del laser scanner.

Questi metodi sono stati sperimentati utilizzando il Test *Ex2.2* (paragrafo 3.2), I residui calcolati rispetto ai GCP sono riportati in tabella 2, che mostra come alcuni dei metodi proposti forniscono dei risultati migliori rispetto all'algoritmo utilizzato dal SW proprietario Riscan, mentre "*intersect*", "*fuzzypos*" e "*radcent*" forniscono approssimativamente i medesimi risultati.

Algoritmo	RMS degli scarti 3-D sui target [mm]	Estimated georeferencing parameters (σ)			
		Rotations of IRS [mgon]			Position of IRS centre [mm]
		Ω	Φ	κ	
<i>maxrad</i>	12.3	7.2	11.3	6.2	2.7
<i>maxrad4</i>	19.1	19.6	30.6	17.0	4.2
<i>radcent</i>	4.0	6.4	10.0	5.3	0.9
<i>fuzzypos</i>	3.9	6.2	9.6	5.5	0.9
<i>intersect</i>	3.8	6.2	9.1	5.1	0.9
<i>riscan</i>	5.0	7.7	11.9	6.6	1.1

Tab. 2. RMSE dei target dopo la georeferenziazione e deviazione standard dei parametri calcolati.

4.2 Precisione e ripetibilità sui target retro-riflettenti

4.2.1 Precisione nella misura dei target

Il test 1 è stato realizzato per valutare la precisione di misura dei target. Per questo sono stati calcolati i parametri di rototraslazione tra l'IRS del laser scanner e il GRS per tutte le configurazioni adottate. Gli RMS calcolati dopo la trasformazione evidenziano che la precisione decresce linearmente con la distanza (2,8 mm a 10 m, 5,1 a 100 m e 9,7 a 300 m) mentre non risulta influenzata dai differenti angoli di incidenza. Anche in questo caso si evidenzia il problema precedentemente citato, è infatti presente un offset tra il centro dei RRT ed il piano interpolante il pannello, una volta che sono stati rimossi i punti di maggior intensità appartenenti ai target. I risultati sono rappresentati in figura 3, dove si evidenzia un errore sistematico in funzione della distanza. Il centro dei target risulta più vicino allo strumento rispetto il piano interpolante. La differenza tra l'offset a 10 m e i restanti è imputabile alla strategia utilizzata da SW Riscan per misurare i target in funzione della distanza.

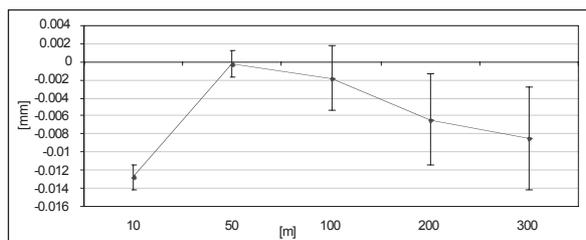


Fig. 3. Bias in funzione della distanza e relative deviazione standard

Al fine di investigare più approfonditamente tale sistematismo per brevi distanze è stato utilizzato il test *Ex2.2*, anche in tal caso i residui rappresentati in figura 4 mostrano un errore sistematico in planimetria imputabile al medesimo errore già riscontrato in range.

I dati acquisiti dal test *Ex3.1* sono stati utilizzati per analizzare nel dettaglio la variazione dell'offset piano-centro target in funzione della distanza e dell'angolo d'incidenza. I risultati (Fig. 5)

presentano una crescita del bias fino alla distanza di 18 m. A distanze maggiori il trend si mantiene costante ed inizia a decrescere lentamente dopo i 28 m, risultati che appaiono in accordo con quelli ottenuti nel caso di lunghe distanze (Test 1).

In seguito sono stati analizzati i dati provenienti dal Test Ex3.2 che prende in considerazione la variazione del centro dei RRT in funzione dell'angolo d'incidenza. In questo esperimento si sono assunte come riferimento le coordinate del target disposto ortogonalmente al raggio incidente. Le differenze misurate tra le coordinate di riferimento e quelle dei target inclinati sono risultate molto piccole e si è evidenziato unicamente un errore sulla distanza. Inoltre si è calcolato, anche in tal caso, l'offset tra piano e centro del target. La figura 6 mostra come l'errore di distanza in funzione dell'angolo d'incidenza può essere attribuito all'offset tra centro del RRT e piano interpolante come confermato dall'alta correlazione lineare tra i due trend ($\rho = -0.93$).

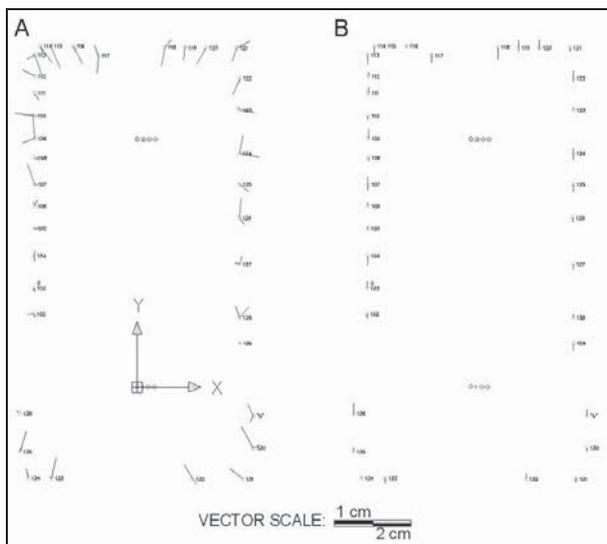


Fig. 4. Residui piano e (A) altimetrici (B), Ex2.2

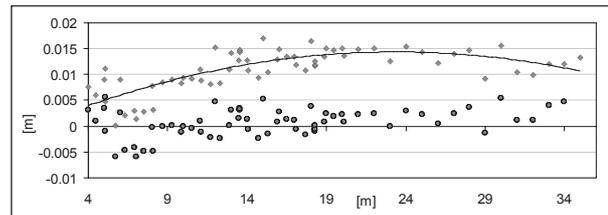


Fig. 5. Bias in funzione della distanza (punti rossi). In blu i residui dopo la modellazione, Ex3.1

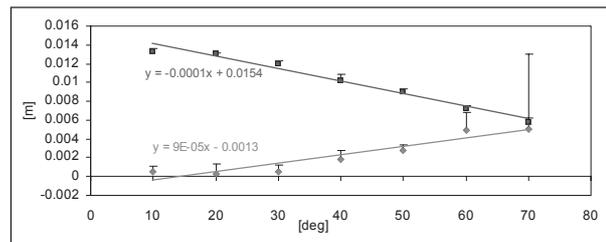


Fig. 6. Errore in range (rosso) e off-plane bias (blu) in funzione dell'angolo d'incidenza, Ex3.2

4.2.2 Analisi della ripetibilità

Al fine di valutare la ripetibilità di misura dei RRT è stata calcolata la deviazione standard delle coordinate e di altri parametri a partire da 9 scansioni ripetute (Test Ex2.1). Il RMSE delle coordinate cartesiane è risultato inferiore ad 1 mm mentre per le coordinate sferiche è risultato di $\pm 4,0$ e $\pm 9,2$ mgon per gli angoli φ e θ e di $\pm 1,1$ mm per la distanza; risultato che rivela una buona ripetibilità delle misure. Una seconda analisi di ripetibilità è stata condotta con il Test Ex2.2 dove lo strumento è stato ruotato sull'asse verticale di 120° tra le rispettive scansioni; il RMSE è stato di $\pm 4,0$ e $\pm 9,2$ mgon per gli angoli φ e θ e di $\pm 3,0$ mm per la distanza. *Modellazione dell'errore*

Durante l'analisi dei dati si è riscontrato unicamente un sistematismo sulla distanza come offset tra il centro del target e la superficie esterna allo stesso, in questa sessione si cercherà di modellare tale errore in funzione della distanza (4-35 m) e dell'angolo di incidenza. In un primo step l'errore verrà modellato solo in funzione del range attraverso la seguente funzione quadratica:

$$\Delta r_r = K_2 r^2 + K_1 r + K_0 \quad (1)$$

Dove Δr_a è la correzione per il range. Grazie al Test Ex3.1 è stato possibile stimare i coefficienti della formula (1) come $K_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ m, $K_1 = 1,2 \cdot 10^{-3}$, and $K_2 = -3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$. La figura 5 rappresenta con i punti blu i residui delle correzioni aventi media nulla ed s.q.m. di $\pm 2,2$ mm.

In un secondo momento i dati sono stati corretti in funzione dell'angolo d'incidenza (α) applicando la seguente correzione lineare:

$$\Delta r_\alpha = K_3 \alpha \quad (2)$$

Dove Δr_r è la correzione per il range. Grazie al Test *Ex3.2* è stato possibile stimare i coefficienti della formula (2) come $K_3 = -1 \cdot 10^{-4}$ m. La figura 7 rappresenta con i punti blu i residui delle correzioni fornite dalle formule (1) e (2) aventi media nulla, deviazione standard di $\pm 0,8$ mm, e valore massimo di 1,7 mm. La formula per la finale correzione del range r_c è quindi:

$$r_c = r + (\Delta r_r + \Delta r_\alpha) \quad (3)$$

Al fine di validare il modello correttivo e stimare i parametri per il Riegl LMS-Z420i è stato utilizzato un diverso dataset (*EX2.2*), le correzioni sono state applicati ai diversi algoritmi precedentemente descritti. Inoltre è stata applicata una modifica all'algoritmo *intersect*, il quale in tal caso misura l'offset tra centro del target e piano ed utilizza tale valore per correggere la distanza. I risultati sono rappresentati in tabella 8, in generale le correzioni apportate migliorano la precisione di georeferenziazione per tutti gli algoritmi in particolare l'algoritmo *intersect2* migliora di quasi il 40% i risultati forniti dal SW RiscanPro.

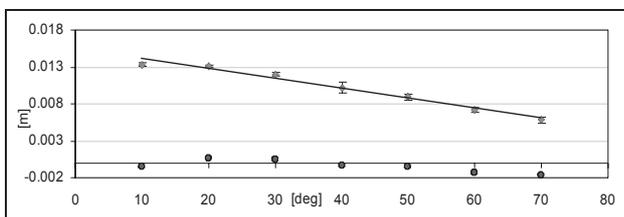


Fig. 7. Bias funzione dell'angolo d'incidenza (p.rossi). In blu i residui dopo la modellazione

Algorithm	RMSE of 3-D residuals on targets [mm]	Estimated georeferencing parameters (σ)			
		Rotations of IRS [mgon]			Position of IRS centre [mm]
		Ω	Φ	K	
<i>intersect2</i>	3.1	5.4	8.2	4.3	0.8
<i>riscan</i>	4.2	6.8	10.7	5.9	0.9
<i>fuzzypos</i>	3.5	5.7	8.9	4.9	0.8

Tab. 8. Bias in funzione della distanza (punti rossi). In blu i residui dopo la modellazione

5. Conclusioni

Nell'articolo sono stati analizzati differenti aspetti inerenti la precisione di misura di target retro-riflettenti (RRT), a tal proposito si possono sintetizzare le conclusioni in tre punti. Primo, sono stati comparati diversi algoritmi per la misura automatica del centro dei RRT. Le tecniche basate sul *fuzzy clustering* si sono dimostrate le migliori. Secondo, la ripetibilità delle misure sui RRT è risultata essere molto buona (minore di 1mm), proprietà importantissima per il monitoraggio a patto che il TLS sia correttamente riposizionato sullo stesso punto. Terzo, tutti i test hanno evidenziato la presenza di un errore sistematico nella misura della distanza, che è stato modellato in funzione della distanza e dell'angolo di incidenza aumentando la precisione di georeferenziazione del 10-16% in funzione dell'algoritmo adottato. Inoltre è stato proposto un nuovo algoritmo che valuta la correzione locale della distanza migliorando di quasi il 40% i risultati forniti dal SW RiscanPro.

Bibliografia

- Alba M., Roncoroni F., Scaioni M., 2008. "Investigations about the accuracy of target measurement for deformation monitoring". *IAPRSSIS*, Vol. 37(B5), pp.1053-1060.
- Monserrat O., Crosetto M., 2008. "Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching". *ISPRS JPRS*, Vol. 63(1), pp. 142-154.
- Lindenbergh R., Pfeifer N., 2005. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In: A. Grün, H. Kahmen (ed.s), *Opt.3-D Meas.Tech.VII*, Vienna, Austria, pp. 61-70.
- Schneider D., 2006. Terrestrial laser scanner for area based deformation analysis of towers and water dams. Proc. of 3rd IAG Symp. of Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Baden, Austria, 22-24 Mag, 6 pp., on CDROM.
- Valanis A., Tsakiri m., 2004. Automatic Target Identification for Laser Scanners. *IAPRSSIS*, Vol. 34(5), pp. 1-6.
- Riegl, <http://www.riegl.com> (ultimo accesso 29 Agosto 2008).