

## Monitoraggio di pareti rocciose con terrestrial laser scanning

Mario Alba(\*), Fabio Roncoroni (\*), Marco Scaioni

(\*) Politecnico di Milano – Polo regionale di Lecco, via Marco d'Oggiono, 0341 488779,  
(mario.alba, fabio.roncoroni, marco.scaioni)@polimi.it

### Abstract

L'articolo vuole descrivere alcune esperienze di monitoraggio realizzate su due pareti rocciose ubicate sulle prealpi lombarde con l'obiettivo di individuare e valutare l'entità dei crolli accorsi durante le diverse epoche di misura intercorse. Il principale obiettivo di questa ricerca è quello di valutare l'utilizzo della tecnologia Terrestrial Laser Scanning (TLS) per effettuare un monitoraggio di alta precisione delle pareti rocciose e fornire così maggiori indicatori per la previsione di possibili frane di crollo. Per primo sono stati analizzati i problemi di acquisizione e georeferenziazione delle scansioni, dove due indipendenti data-set acquisiti durante la medesima epoca temporale sono stati utilizzati al fine di comparare e valutare i differenti metodi di georeferenziazione utilizzati. Secondariamente è stato analizzato il problema della rimozione della vegetazione presente sulla parete dalla nuvola di punti, analizzando alcune metodologie esistenti e proponendone di nuove. Infine, sulla base delle migliori metodologie testate dall'analisi comparativa dei diversi metodi, sono presentati i risultati ottenuti dal monitoraggio multi-temporale con TLS.

*The paper describes some experiences carried out in monitoring two rock faces in Italian Prealps in order to detect changes due to rock detachments happened during the observation epochs. Being the forecasting of possible rockfall events the main aim of this research, TLS application was investigated for their use in high precision deformation monitoring. Problems concerning the data acquisition and the reduction of georeferencing errors are analyzed first by comparing results obtained from different approaches. Secondly, some techniques that can be applied for removing vegetation from point-clouds are presented and discussed. Finally, results on the comparison of multi-temporal laser scans are presented.*

### 1. Introduzione

La prevenzione e riduzione dei danni causati dalle frane di crollo è un problema molto complesso a causa dell'elevato numero di possibili scenari e dalla specifica morfologia di ogni sito in esame. Per tali ragioni è spesso necessario un'analisi multi-disciplinare dove, le differenti competenze, collaborano al fine di valutare il problema nella sua complessità con le migliori tecnologie disponibili. In questa ottica la tecnica TLS (Terrestrial Laser Scanning) permette di ottenere facilmente modelli digitali di pareti rocciose (Alba et al., 2005) e conseguentemente anche una analisi geomorfologia della stessa (Roncella and Forlani, 2005; Abellán et al., 2006). Attualmente l'interesse della ricerca è incentrato su diverse applicazioni di monitoraggio con TLS aventi un duplice scopo.

Il primo riguarda la possibilità di rilevare delle deformazioni di ordine millimetrico con l'obiettivo di fornire dei pre-segnali di allarmi di possibili crolli. Questo aspetto è realmente complesso a causa della necessità di misurare degli spostamenti inferiori all'incertezza dello strumento TLS. Negli ultimi anni sono stati sviluppati differenti metodi *area-based* che sfruttano la ridondanza delle informazioni fornite dal TLS per migliorarne la precisione (Lindenbergh and Pfeifer, 2005; Schneider, 2006). Purtroppo tali metodi richiedono la presenza di superfici regolari per poter

interpolare la nuvola di punti con funzioni analitiche, ma sfortunatamente questa assunzione è impossibile da attuare nel caso di parete rocciose. Oltre al problema della precisione di acquisizione e modellazione esistono ulteriori problemi che devono essere trattati con attenzione. Le deformazioni possono interessare generalmente un intero versante o solo una piccola porzione dello stesso. Per il primo caso è necessario definire un GRS (ground reference system) stabile che venga misurato ad ogni epoca con tecniche topografiche di alta precisione oppure in alternativa è necessario comparare le superfici instabili con aree esterne ritenute stabili, anche se spesso tale metodo non permette di garantire le precisioni richieste. Nel secondo caso il problema può essere risolto considerando unicamente gli spostamenti relativi a una zona utilizzando per esempio L.S. 3-D surface matching (Monserrat and Crosetto, 2008; Acka, 2007) o altri metodi locali per comparare i DSM. In aggiunta, molto frequentemente, sulle pareti in roccia è presente parecchia vegetazione che crea un notevole disturbo durante l'elaborazione dei dati e la misura degli spostamenti alle differenti epoche.

Il secondo aspetto riguarda la possibilità di valutare il volume di materiale che si stacca dalla parete tra le differenti epoche di misura il che comporta l'analisi dei cambiamenti della superficie. La valutazione dell'ammontare e della distribuzione dei distacchi, non è solo un requisito utile per l'analisi delle deformazioni, ma può fornire ulteriori importanti risultati al fine di valutare con esattezza la reale magnitudo del rischio di crollo in una data area.

La misura della quantità di materiale che si distacca dalla parete è un problema di *change-detection* e questo sarà il principale oggetto di questo articolo. Nelle sessioni 2 e 3 verranno presentati alcuni aspetti inerenti l'acquisizione dei dati ed il confronto dei risultati ottenuti con differenti metodologie di georeferenziazione. Nella sessione 4 verranno discussi e proposti alcuni metodi per la rimozione della vegetazione dalla nuvola di punti ed infine verranno presentati e discussi i risultati raggiunti.

## **2. Data acquisition**

### **2.1 Descrizione del sito**

Per effettuare i test sperimentali sono state selezionate due differenti pareti, entrambe disposte sul medesimo versante ubicato in provincia di Lecco, Italy (vedi figura 1). Queste pareti sono state scelte sia per le loro caratteristiche geomorfologiche che per la vicinanza ad una strada e quindi di facile accesso.

Entrambe le pareti rocciose sono composte da un particolare calcare tipico della zona in esame chiamato "Calcare di Esino" ed in particolare, la parete B si presenta alla vista come estremamente frantumata e degradata, ricca quindi di fessure che facilitano l'effetto dilavante delle acque e il distacco di clasti per effetto del gelo e delle variazioni termiche in genere. Contrariamente la parete A risulta molto sana e compatta e non presenta nessun fenomeno di crollo.

La parete disposta più in alto (parete A) ha una estensione di circa 75m x 30m, dista mediamente 160m dal punto di stazione ed è stata scelta per valutare il miglior metodo di georeferenziazione da utilizzare. La parete disposta in basso (parete B) ha un'estensione molto più limitata nello spazio (25m x 15m) e si trova a breve distanza dal laser, valutabile mediamente in una decina di metri; questa è stata scelta per valutare l'influenza della vegetazione sull'analisi delle deformazioni.

### **2.2 Rete topografica di controllo**

La rete topografica, rilevata in ciascuna epoca di misura, è stata realizzata con un duplice scopo: determinare le coordinate dei target da utilizzare per la georeferenziazione e controllare la posizione dei punti di stazione utilizzati per il monitoraggio con il TLS. Per le misure di controllo è stata utilizzata una stazione totale robotizzata leica TCA 2003 mentre le due differenti tipologie di punti di controllo sono materializzati rispettivamente con placchette di acciaio rivestiti di pellicola retroriflettente (riconoscibili dal TLS) e con dei perni porta-mira cementati nella roccia, sui quali, durante le operazioni di misura, sono state montate delle mire topografiche di precisione. Per il rilievo della parete A è stato sufficiente realizzare un unico punto di stazione mentre per quella B, a causa della sua morfologia sono state predisposte due postazioni di misura. I punti di controllo sono stati individuati su una parete rocciosa adiacente alla strada e sulla banchina della stessa ed hanno

permesso di valutare gli spostamenti dei punti di stazione che sono risultati, per ciascun controllo, sempre inferiori a  $\pm 1\text{mm}$  e dello stesso ordine di grandezza dell'incertezza di misura.

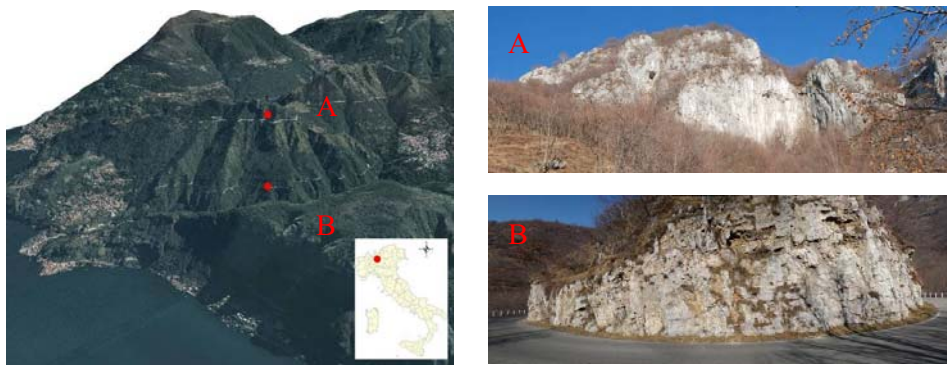


Figure 1. Ubicazione delle pareti in esame

### 2.3 Acquisizione dei dati con TLS

L'utilizzo del TLS su un pilastrino riposizionabile con precisione permette di considerare, nelle varie campagne di misura, il punto di stazione ed il sistema di riferimento intrinseco dello strumento (IRS) invariato a meno di errori trascurabili. A conferma di questa ipotesi le misure di controllo eseguite con la stazione totale nel corso di ciascuna epoca di misura hanno mostrato variazioni inferiori a  $\pm 1\text{mm}$ .

Lo strumento utilizzato per la sperimentazione è un RIEGL LMS-Z420i, per informazioni sullo strumento si rimanda al sito della casa costruttrice (RIEGL). Per la sperimentazione in esame sono state effettuate quattro campagne di misura nei mesi di novembre e dicembre 2007, febbraio e marzo 2008. Durante la prima campagna di misura, dopo la prima acquisizione della parete e dopo aver riposizionato lo strumento sul pilastrino ne è stata acquisita una seconda per verificare la validità del sistema di riposizionamento e testare il miglior metodo di georeferenziazione da utilizzare. Per tutte le campagne di misura si sono utilizzati gli stessi parametri di rilievo, ossia la medesima finestra di acquisizione e la modalità multi-scan (4 ripetizioni) al fine di aumentare la precisione di misura della distanza.

### 3. Georeferenziazione delle scansioni

Per qualsiasi operazione di monitoraggio la scelta e la materializzazione di un sistema di riferimento stabile è fondamentale. In questi test il SdR è stato materializzato attraverso l'uso dei pilastrini inquadrati in reti topografiche locali. I pilastrini hanno permesso di riposizionare il centro del SdR intrinseco dello strumento sempre nello stesso punto mentre la rete topografica d'inquadramento ha consentito di fissare l'orientamento in quanto il sistema di aggancio del TLS sul pilastrino, studiato per vincolare la rotazione del SdR, si è dimostrato inefficace. La procedura seguita, ed il confronto delle differenti metodologie di georeferenziazione analizzate, sono riportate in Alba et al. (2009); successivamente si riportano unicamente i metodi che hanno fornito i migliori risultati e quindi utilizzati per le operazioni di monitoraggio.

#### Parete A

Il metodo utilizzato sfrutta il vincolo sulle traslazioni dell'IRS garantito dal posizionamento del TLS sul pilastrino, mentre le rotazioni vengono determinate con un algoritmo di surface matching. Il pilastrino garantisce inoltre un posizionamento approssimato della nuvola di punti da georeferenziare, risulta quindi possibile applicare un algoritmo ICP (iterative closest point) tra la scansione da georeferenziare e quella di riferimento imponendo un vincolo alle traslazioni del centro di presa. Questa metodologia ha permesso di ottenere precisioni pari a  $\pm 16\text{ mm}$ , ricavate dal confronto tra le due scansioni acquisite durante la prima epoca di misura.

### Parete B

Per la parete B la georeferenziazione delle due scansioni si è dimostrata molto più semplice in quanto, la possibilità di posizionare i target direttamente sulla superficie da rilevare, le esigue distanze in gioco e la buona sovrapposizione tra le due scansioni hanno permesso di ottenere ottimi risultati anche con il metodo dei GCP (Ground Control Point) che risulta essere quello più automatizzato. Questo, per la scansione di verifica acquisita alla prima epoca di misura, ha fornito i seguenti risultati: RMS=9.2mm.



Figure 2. Fasi di montaggio del piastrino mobile sulla piastra di ancoraggio

### 4. Filtraggio della vegetazione

Un problema ricorrente nell'analisi delle pareti rocciose è la presenza di zone ricche di vegetazione che impediscono o disturbano l'acquisizione della superficie rocciosa. Per tale motivo è spesso necessario l'utilizzo di metodi di filtraggio che generalmente sfruttano la ridondanza delle informazioni fornite dalla nuvola di punti. Una sintesi dei metodi più utilizzati è presente in Alba *et al.* 2009, mentre nel restante paragrafo verrà trattata unicamente la procedura utilizzata per il filtraggio dei dati della parete in esame (parete B) ed infine verrà proposta una nuova metodologia. La prima operazione da effettuare per l'elaborazione delle nuvole di punti è quella di ricampionare le scansioni effettuate in modalità multiscan, dove vengono mediate le misure di distanza acquisite per ogni punto misurato. In questa fase è possibile impostare una soglia di deviazione standard al di sopra della quale la misura non viene considerata attendibile ed il punto scartato. Tale operazione, come evidenziato in figura 3, permette di eliminare facilmente gran parte della vegetazione rilevata. Il secondo metodo utilizzato, per rimuovere la restante vegetazione, è un metodo iterativo (Axelsson's 2000). Questo genera una superficie 2.5D (DEM) a partire dalla nuvola di punti ricampionata  $S$  rispetto ad un piano di riferimento  $\pi$  suddiviso in celle quadrate; nel caso la nuvola di punti presenti forma complessa dovranno essere utilizzati più piani. Successivamente la nuvola  $S$  viene proiettata sul piano  $\pi$  e, se più punti ricadono sotto la stessa cella di dimensioni  $\Delta$ , verrà selezionato solo il punto con  $z_{\min}$  dove l'asse  $z$  è ortogonale al piano  $\pi$ . Dopo questo step iniziale viene quindi creato un sottogruppo di punti  $S'$  della nuvola iniziale  $S$  da cui si ricava un nuovo DEM. Successivamente  $S'$  viene comparata con la superficie del DEM e vengono mantenuti solo i punti che risultano a distanza inferiore ad una certa soglia  $d_{\max}$ . Il processo viene ripetuto iterativamente riducendo per ogni step i parametri  $\Delta$  e  $d_{\max}$ , fin quando tutta la vegetazione non viene completamente rimossa.

A causa della complessità morfologica delle pareti in roccia risulta molto difficile ottenere dei risultati soddisfacenti con dei filtri semiautomatici. Per questo si sta progettando un sistema per il riconoscimento automatico della vegetazione tramite camere ad alta definizione capaci di misurare l'infrarosso vicino. Integrando al sistema TLS una camera capace di misurare l'infrarosso, l'operazione di filtraggio risulta facile, precisa e soprattutto totalmente automatica. Come camera è

possibile utilizzare una semplice reflex, opportunamente adattata per la misura dell'infrarosso, in questo modo anche il posizionamento sul TLS e la relativa calibrazione risultano operazioni elementari. Una volta acquisite le immagini e colorata la nuvola di punti non rimane altro che filtrarla eliminando i punti appartenenti alla gamma RGB del colore rosso.

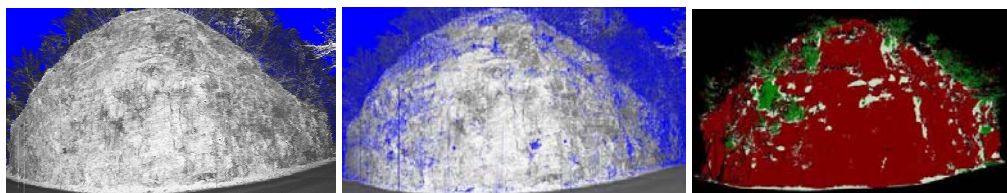


Figure 3. Ricampionamento multiscan con filtro sulla std.dev della distanza (sinistra e centro), filtraggio con metodo iterativo (destra)

### 5. Risultati del monitoraggio

Per verificare eventuali deformazioni ed individuare le aree soggette a crolli sono state confrontate tra loro le nuvole di punti acquisite alle diverse epoche con la superficie di riferimento creata con i dati acquisiti durante la prima campagna di misura.

Per la parete A non si sono riscontrati né crolli né evidenti deformazioni della parete, i confronti effettuati per ogni epoca presentano un errore casualmente distribuito sull'intera estensione della parete compreso tra  $\pm 1$  cm e pari alla precisione intrinseca di misura di distanza del laser, come testimoniato dall'immagine e dai dati numerici riportati in figura 4.

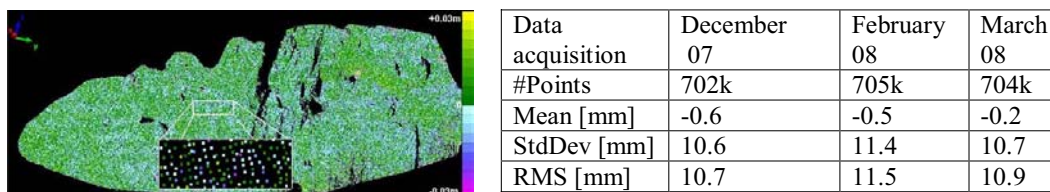


Figure 4. Deformazioni della parete A e risultati numerici di ciascuna epoca.

La figura 5 mostra il confronto tra la prima e l'ultima acquisizione effettuata sulla parete B, per facilitare l'immediata individuazione delle aree interessate dal distacco non sono state rappresentate le variazioni imputabili all'incertezza di misura propria dello strumento e visualizzate solo le variazioni negative. Nelle aree che permangono evidenziate possiamo con ragionevole certezza affermare ci sia stato un distacco di materiale, di cui si può valutare sia l'esatta posizione che la dimensione dell'elemento.

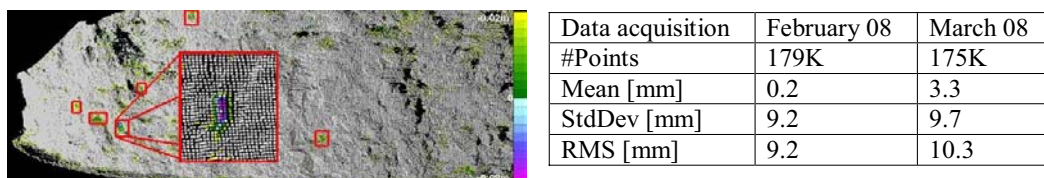


Figure 5 Deformazioni della parete B e risultati numerici di ciascuna epoca.

I risultati evidenziano la presenza di nuove cavità, che non erano presenti sulla parete durante la prima scansione; queste hanno dimensioni non trascurabili, con una profondità valutata dell'ordine della decina di centimetri. Coerentemente con quanto ci si aspettava e ad ulteriore dimostrazione

che non si tratta di un errore, sono stati rinvenuti a bordo strada, in corrispondenza della zone segnalate, dei frammenti di roccia crollati dalla parete. (figure 6).

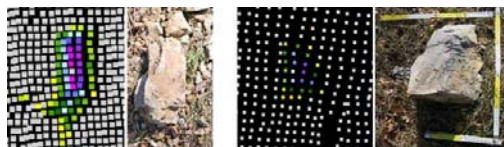


Figure 6. Immagine di alcuni blocchi di roccia rinvenuti sulla sede stradale.

## 6. Conclusioni

La metodologia sperimentata ha permesso di ricostruire con una elevata precisione la morfologia della parete, permettendo di individuare e valutare le aree e le entità dei distacchi avvenuti anche per massi di dimensione volumetrica dell'ordine di pochi dm<sup>3</sup>. Durante l'elaborazione dei dati sono state affrontate le problematiche legate alla georeferenziazione delle scansioni e all'eliminazione del disturbo della vegetazione. Entrambe queste problematiche sono state analizzate con le metodologie suggerite nel testo. In particolare il problema della georeferenziazione è stato affrontato con l'utilizzo accoppiato di un vincolo sull'origine e di algoritmi basati sull'I.C.P. Il problema della vegetazione è stato invece affrontato con due metodologie che hanno dato risultati discreti ma sono risultate abbastanza laboriose. A tal proposito è stata suggerita una nuova tecnica basata sull'utilizzo di immagini all'infrarosso ad alta risoluzione che integrate al sistema TLS potrebbero fornire risultati eccellenti ed essere di facile utilizzo. Le problematiche riscontrate durante l'elaborazione dei dati hanno permesso di definire una procedura standardizzata che ripetuta durante tutte le campagne di misura effettuate ha evidenziato la coerenza e l'affidabilità del metodo utilizzato.

## Bibliografia

- Abell'an, A., Vilaplana, J. M., and Mart'inez, J.: Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de N'uria, Eng. Geol., 88(3-4), 136-148, 2006.
- Ack, D., 2007. Matching of 3D Surfaces and their intensities. ISPRS JPRS, Vol. 62(2), pp. 112-121.
- Alba M., Longoni L., Papini M., Roncoroni F., Scaioni M., 2005. Feasibility and Problems of TLS in Modeling Rock Faces for Hazard Mapping. IAPRSSIS, Vol. XXXVI, Part 3/W19, Enschede (The Netherlands), pp. 156-161 (ISSN 1682-1750)
- Alba M., Roncoroni F., Scaioni M., 2009. "application of tils for change detection in rock faces". IAPRSSIS, Vol. 38(3/W8), pp.99-104
- Axelsson P., 2000. DEM generation from Laser Scanner Data using adaptive TIN Models. IAPRS, Vol. 33 B4/1 pp. 110-117.
- HySpex product and service <http://www.neo.no/products/hyperspectral.html> (last accessed on 6th April 2008).
- Leica, <http://www.leica-geosystems.com>, (last accessed on 16th June 2009).
- Lindenbergh, R. and N. Pfeifer, 2005. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. Proc. 7th Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, 3-5 Oct, Part 2, pp. 61-70.
- Monserat, O. and M. Crosetto, 2008. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. ISPRS JPRS, Vol. 63(1), pp. 142-154.
- Roncella, R. and Forlani G., 2005. Extraction of planar patches from point clouds to retrieve dip and dip direction of rock discontinuities. In: IAPRSSIS, 36(3/W19), pp. 162-167.
- Riegl, <http://www.riegl.com> (last accessed on 16th June 2009).
- Schneider, D., 2006. Terrestrial laser scanner for area based deformation analysis of towers and water dams. Proc. of 3rd IAG Symp., Baden, Austria, 22-24 May. 6 pp., on CDROM.