

# MONITORAGGIO DA TERRA DI VERSANTI INSTABILI CON LASER SCANNER E RADAR INTERFEROMETRICO

Giordano Teza<sup>(\*)</sup>, Massimiliano Pieraccini<sup>(\*\*)</sup>, Antonio Galgaro<sup>(\*)</sup>, Guido Luzi<sup>(\*\*)</sup>, Nicola Zaltron<sup>(\*\*\*)</sup>

(\*) Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica, Università degli Studi di Padova, Via Giotto, 1, 35137 Padova.  
E-mail: {giordano.teza, antonio.galgaro}@unipd.it

(\*\*) Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni, Università degli Studi di Firenze, Via S. Marta, 3, 50139 Firenze

(\*\*\*) Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara, Via Quartieri, 8, 44100 Ferrara

## Riassunto

Il laser scanner terrestre (TLS) ed il radar interferometrico terrestre ad apertura sintetica (InSAR) sono tecniche innovative, le cui peculiarità, *in primis* l'acquisizione di dati spazialmente continui, ne favoriscono un impiego crescente nel telerilevamento di versanti instabili. Le due tecniche sono state applicate al monitoraggio di fenomeni franosi ben conosciuti e studiati, allo scopo di valutarne efficacia e grado di operatività. La sperimentazione congiunta ha evidenziato che tali strumentazioni presentano un forte carattere di complementarità e che possono integrarsi per fornire dati di grande qualità su superfici estese, permettendo così di costruire un quadro dettagliato della geometria e della cinematica di un versante instabile con tutti i vantaggi offerti da metodologie "non a contatto". Alle tipiche distanze di acquisizione, dell'ordine del centinaio di metri, il TLS può valutare spostamenti centimetrici con risoluzione spaziale (in direzione ortogonale) dell'ordine di qualche centimetro, mentre l'InSAR può rilevare spostamenti millimetrici con cadenza minima oraria, ma con risoluzione spaziale di qualche metro e con problemi nel rilievo multitemporale. L'integrazione delle due tecnologie consente di sfruttarne pienamente i vantaggi e di superarne le limitazioni, da cui un sistema di monitoraggio continuo particolarmente adatto alla mitigazione del rischio idrogeologico.

## Abstract

Terrestrial laser scanner (TLS) and ground-based synthetic aperture interferometric radar (InSAR) are innovative techniques whose peculiarities, primarily the acquisition of spatially continuous data, favor their use in the remote sensing of unstable slopes. Both the techniques have been applied to monitoring of well-known and studied unstable slope phenomena, in order to evaluate their efficiency and operability. This experimentation has evidenced that the two techniques have a strong degree of complementarity and they may be integrated in order to obtain high-quality data on large surfaces; in this way, a complete and reliable picture of geometry and kinematics of an unstable slope can be made. At typical acquisition distances (some hundreds of meters), the TLS can evaluate centimetric displacements, with spatial resolution at the order of few centimeters. The InSAR technique may detect millimetric displacements with minimum temporal cadence of an hour, but with a spatial resolution at the order of some meter and complications if multitemporal observations are performed. The integration of these techniques allows to take advantage of their resources as well as to overcome their limits; in this way, a continuous monitoring system is obtained and may be used in order to mitigate the hydrogeological risk.

## Introduzione

Nel panorama delle tecniche di monitoraggio di versanti instabili oggi disponibili, il laser scanner terrestre (TLS) e il radar interferometrico terrestre ad apertura sintetica (InSAR) si distinguono perché consentono la rapida acquisizione di dati spazialmente continui di superfici tridimensionali,

ossia possono eseguire scansioni di ampie superfici con griglie di campionamento dell'ordine di qualche centimetro (TLS) o del metro (InSAR) per distanze di osservazione dell'ordine delle centinaia di metri. Il TLS consente la generazione di modelli dettagliati 3D o 2.5D della superficie monitorata e, allorché siano disponibili modelli di una stessa frana ottenuti da dati offerti da scansioni multitemporali, permette di acquisire molta informazione utile riguardo alle deformazioni intercorse nell'intervallo di osservazione, con la possibilità di precisare il campo degli spostamenti (Teza et al., 2004). L'InSAR, al contrario, non acquisisce la forma della superficie analizzata, ma spostamenti intercorsi tra due diverse scansioni; esso è in grado di apprezzare spostamenti millimetrici lungo la linea di vista; inoltre, possono eseguirsi monitoraggi in continuo, eventualmente con controllo in remoto. La risoluzione spaziale in *cross-range* (cioè nella direzione ortogonale al fascio radar) è però dell'ordine del metro, cosicché possono valutarsi fenomeni deformativi in atto su aree di qualche metro quadrato (rappresentate da un unico pixel nell'immagine interferometrica), senza tuttavia distinguere particolari all'interno di esse. L'InSAR non consente la generazione di modelli dettagliati di superfici: i dati radar vengono infatti proiettati su DTM (modelli digitali di terreno) di diversa origine. Nell'osservazione multitemporale di fenomeni rapidi possono esservi inoltre problemi legati al fatto che il risultato è definito a meno di multipli interi della lunghezza d'onda del segnale radar.

Si tratta dunque di tecniche di telerilevamento terrestre altamente innovative ma assai diverse. Al fine di valutarne specificità, analogie, differenze e, soprattutto, interoperabilità, esse sono state applicate congiuntamente ad alcuni fenomeni di instabilità in Provincia di Belluno (Alpi Orientali), vale a dire le frane di Perarolo di Cadore e di Lamosano. I test hanno visto la partecipazione delle Università di Padova, Firenze e Ferrara nel quadro di un Progetto di Rilevante Interesse Nazionale.

## **Il laser scanner**

Un TLS può considerarsi un radar che utilizza un fascio laser. In quanto radar, esegue la scansione di un'intera superficie; in quanto laser, la precisione e la risoluzione possono essere centimetriche, pur a distanze dell'ordine del centinaio di m, grazie alla coerenza spaziale e temporale e alla possibilità di generare impulsi di breve durata, caratteristiche di un fascio laser. In un TLS a tempo di volo (TOF TLS), un impulso della durata di qualche nanosecondo viene emesso, riflesso dal bersaglio e infine acquisito da un rivelatore in asse con la sorgente laser; dalla misura del tempo di volo  $t$  si deduce la distanza (o *range*)  $d = ct/2$ , dove  $c$  è la velocità della luce, e da essa e dalle coordinate angolari del fascio si deducono le coordinate cartesiane  $(x, y, z)$  del punto che ha dato luogo alla riflessione (figura 1). L'insieme dei dati di uscita è la *nuvola di punti*  $(x, y, z, R(x, y, z))$ , ove  $R(x, y, z)$  è la riflettanza del punto  $(x, y, z)$ . La risoluzione nella misura della distanza è 3-4 mm, mentre nella direzione ad essa ortogonale è di qualche cm a 100 m. La precisione di un ottimo strumento a lunga portata è di 7-8 mm a 100 m ( $1\sigma$ ).

L'acquisizione dei dati durante il rilievo in campagna è facile e veloce, non richiedendo monumentazione alcuna; ad esempio, un versante instabile di circa 200 m x 150 m, osservato da una distanza media intorno ai 250 m, può essere interamente acquisito in una quarantina di minuti, fornendo una nuvola costituita da circa 6 milioni di punti con un passo di scansione medio (sulla superficie) di circa 3.5 cm. L'elaborazione di questa ingente mole di dati richiede invece grandi risorse di calcolo e specifico software professionale, ad esempio Polyworks (InnovMetric, 2005) o Cyclone (Leica, 2005a). Tali software permettono di generare, a partire da una nuvola di punti, un modello digitale di superficie (DSM), cioè una superficie (immersa nello spazio 3D) tassellata mediante triangoli; tale operazione, oltre ad ottimizzare le risorse di memoria richieste per la gestione dei dati, consente la pulizia dei dati, con l'eliminare di eventuali riflessioni spurie, o anche di modellare con adeguati criteri delle zone non acquisite dal TLS e permettere così il calcolo di volumi (Axelsson, 1999). Se l'osservazione di un oggetto esteso richiede l'esecuzione di due o più scansioni da punti di vista differenti, la modellazione è subordinata alla registrazione delle scansioni parziali, da concatenare su un sistema di riferimento comune. Ciò può ottenersi mediante

individuazione di punti omologhi in aree di sovrapposizione e ricorso a specifici algoritmi di adattamento geometrico come ICP (Besl e McKay, 1992), implementati nel software di elaborazione.

La georeferenziazione di una nuvola di punti (o comunque l'introduzione di un adeguato sistema di riferimento) viene spesso eseguita ricorrendo a bersagli artificiali ad alta riflettività, facilmente individuabili e modellabili in essa, e contemporaneamente acquisiti tramite stazione per individuarne le coordinate assolute. In alternativa, la georeferenziazione può eseguirsi riferendosi ad una scansione precedente in cui vi siano dei punti certamente fermi, e considerando ancora punti omologhi e adattamento di superfici. Il primo metodo richiede un lavoro maggiore in campagna (posa e localizzazione dei target artificiali), però offre una precisione migliore di quasi un ordine di grandezza (alcuni mm in luogo di 1-2 cm).

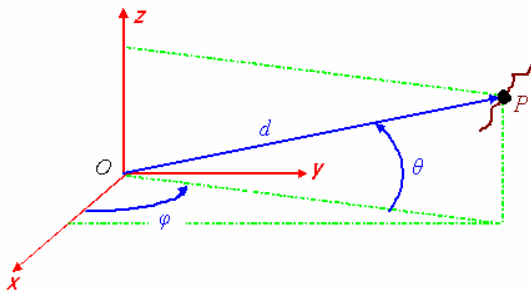


Figura 1 – Schema dell'acquisizione di un TOF TLS. Le coordinate  $x$ ,  $y$  e  $z$  del punto  $P$  che ha prodotto la riflessione sono ottenute dalla distanza, dedotta dal tempo di volo misurato, e dalle coordinate angolari  $\varphi$  e  $\theta$  del fascio laser. La scansione dell'intera superficie da osservare viene eseguita incrementando  $\varphi$  e  $\theta$  di valori costanti, scelti dall'utente.

### Il radar interferometrico ad apertura sintetica

L'interferometria radar, nata per l'osservazione del terreno da satellite, è stata solo successivamente estesa a strumenti terrestri. In un'un'immagine InSAR ogni pixel contiene informazioni sulla differenza di fase tra il segnale trasmesso e quello riflesso, come pure sulle loro ampiezze; se uno scenario viene osservato negli istanti  $t_1$  e  $t_2$  dalla stessa posizione, e un dato pixel ha subito uno spostamento in  $t_2 - t_1$ , il confronto delle due immagini radar fornisce la differenza di fase indotta da tale spostamento e quindi permette di misurarne la componente lungo la linea di vista. Il confronto in fase di ripetute osservazioni consente di studiare spostamenti della superficie anche millimetrici, come pure movimenti continui ma lenti. Lo schema di principio è riportato in figura 2.

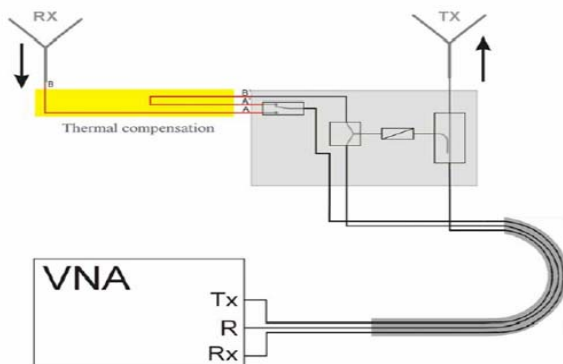


Figura 2 – Schema di principio dell'InSAR terrestre. Le antenne trasmittente (TX) e ricevente (RX) sono mosse lungo una rotaia lunga 1.8 m; un bersaglio è osservato da differenti posizioni e a frequenze diverse. In tal modo, viene simulata un'antenna con la stessa lunghezza della rotaia ("radar ad apertura sintetica", SAR). Eventuali spostamenti del bersaglio intercorsi tra due scansioni si traducono in differenze di fase ("radar interferometrico"). VNA: analizzatore.

L'InSAR terrestre consente il monitoraggio di frane, dighe, ponti, ma anche di piccoli edifici. La strumentazione è portatile e di rapida installazione, anche se richiede un basamento stabile in calcestruzzo di lunghezza almeno pari a quello della rotaia (dunque intorno ai 2 m). Le misure InSAR possono essere eseguite in un range da alcune centinaia di m ad alcuni km; il monitoraggio può essere continuo, con sessioni generalmente protratte per più giorni, oppure discontinuo (scansioni multitemporali, eventualmente intervallate di alcuni mesi). Nella seconda modalità

possono tuttavia presentarsi due problemi. Il primo è legato alla coerenza del segnale radar: un diverso stato della vegetazione, il moto di materiali incoerenti (ghiaia, detriti), diverse condizioni meteorologiche o anche altri fattori possono far sì che la differenza di fase misurata non sia rappresentativa degli spostamenti intervenuti; il problema può essere sormontato, almeno in parte, utilizzando la tecnica dei *permanent scatters*, punti per i quali il dato interferometrico soddisfa stringenti richieste di qualità. Il secondo è legato all'ambiguità del calcolo della deformazione a partire dalla differenza di fase: il risultato è identificato a meno di multipli interi di metà della lunghezza d'onda del segnale ( $\lambda = 5.12$  cm nello strumento utilizzato). Se lo spostamento supera  $\lambda/2$ , l'ambiguità va risolta mediante ulteriori informazioni, fornite ad esempio dal TLS.

Si sottolinea che l'InSAR non ricostruisce geometrie tridimensionali, ma solo spostamenti lungo la linea di vista; di conseguenza, i risultati devono essere proiettati su DTM disponibili e dotati di adeguata risoluzione. Le applicazioni dell'InSAR sono ormai numerose (p. es.: Tarchi et al., 2003).

### Casi studio: frane di Perarolo di Cadore e di Lamosano

TLS e InSAR sono stati utilizzati congiuntamente in due siti caratterizzati da importanti fenomeni di instabilità di versante, entrambi ubicati nelle Alpi Nord-Orientali e prescelti sia per la loro condizione di elevata pericolosità e vulnerabilità, perché già studiati con metodi tradizionali.

**Perarolo di Cadore.** La frana di S. Andrea a Perarolo di Cadore presenta le seguenti caratteristiche: estensione 530-630 m s.l.m., larghezza 150 m, profondità della superficie di scivolamento 25-30 m, volume stimato  $2.5 \times 10^5$  m<sup>3</sup>). L'alto rischio indotto è correlato al possibile sbarramento di un torrente di considerevole portata (Squarzoni, 2003); il movimento della massa instabile, generalmente dell'ordine di 20-25 cm all'anno, risulta più elevato proprio nei periodi di intense precipitazioni, in cui la portata del torrente è massima. La frana è continuamente monitorata mediante inclinometri e un sistema di 3 ricevitori GPS in modalità differenziale.



Figura 3 - Nuvola di punti della frana di Perarolo di Cadore, acquisita con TLS Optech, vista da sud.

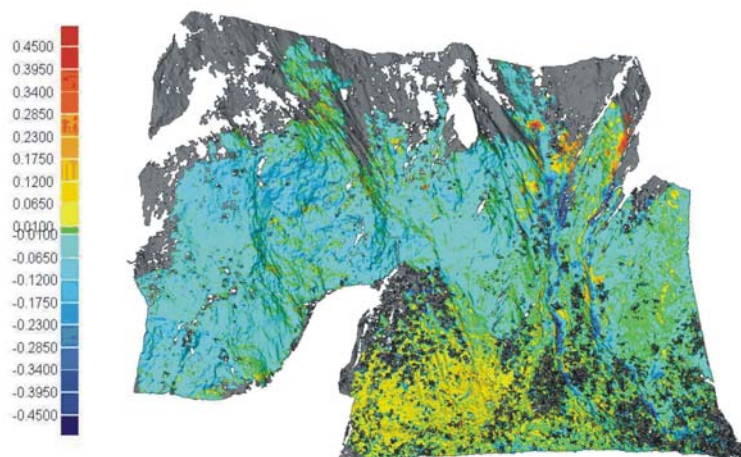


Figura 4 – Spostamenti della parte inferiore della frana, vista da ovest (TLS Leica, 10.2004 e 06.2005; i gradoni in fig. 3 non sono qui visibili). Si osserva un moto generale di rotazione, con componenti in direzione opposta dovute ad erosione.

Finora sono state eseguite quattro scansioni con TLS a lungo range Optech ILRIS 3-D (Optech, 2005), nelle quali è stata acquisita l'intera superficie in frana (dicembre 2002, aprile 2004, settembre 2004 e luglio 2005), e due con TLS a medio range Leica HDS 3000 (Leica 2005b), relative ad un settore particolare del corpo di frana (settembre 2004 e luglio 2005). Le scansioni Optech sono state georeferenziate mediante individuazione di punti omologhi, mentre quelle con

Leica mediante target ad alta riflettività (l'entità degli spostamenti attesi è compatibile con entrambe le tecniche). Le osservazioni con InSAR sono state due, in ottobre 2004 e giugno 2005. L'analisi dei dati TLS acquisiti a Perarolo è basata sul confronto tra modelli digitali di terreno (DTM) ottenuti da scansioni multitemporali. Un DTM è modello 2.5D del tipo  $z = z(x, y)$ , in cui l'elevazione  $z$  viene correlata ad una griglia planare e regolare di riferimento  $xy$ . Esso rappresenta la superficie in frana ed è generato usando i dati del DSM e un'adeguata tecnica di interpolazione, implementata in software specifico, ad esempio Surfer (Golden Software, 2005). Nel periodo settembre 2004 - luglio 2005 il laser scanner ha evidenziato spostamenti in linea con quanto atteso (figura 4), ossia un moto generale di rotazione con sovrapposti fenomeni locali di erosione ad opera di agenti atmosferici, mentre l'InSAR non ha potuto fornire dati validi a causa della perdita di coerenza dell'immagine interferometrica, pur con basamento molto stabile: le modificazioni morfologiche legate a vegetazione, erosione atmosferica e anche ai lavori di consolidamento della frana si sono rivelate essere eccessive. Va comunque osservato che durante i periodi di monitoraggio in continuo (27.09-05.10.2004 e 17-22.06.2005) la coerenza si è sempre mantenuta, anche se non sono stati evidenziati spostamenti, complice l'assenza di precipitazioni.

**Lamosano.** Il centro abitato di Lamosano (Comune di Chies d'Alpago) è parzialmente edificato su terreno instabile; alcuni edifici presentano danni di varia entità, da piccole crepe a rilevanti cedimenti strutturali. L'approccio seguito per il monitoraggio è sostanzialmente diverso rispetto a quello considerato a Perarolo: ad essere osservata non è la superficie di frana, ma il paese costruito su di essa. Il fenomeno, i cui primi movimenti di una certa entità risalgono all'inizio degli anni '60, è di tipo complesso, con zone sostanzialmente ferme, altre con piccole componenti di movimento e altre infine interessate da movimenti annui centimetrici. In paese sono distribuite alcune decine di punti topografici, alcuni dei quali utilizzati per la validazione dei risultati con GPS.

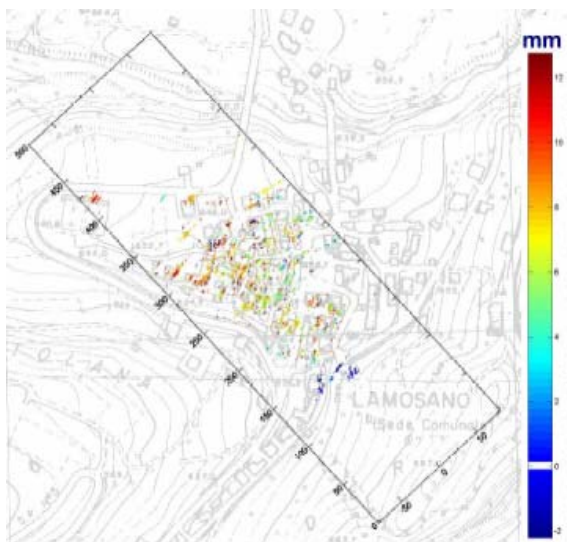


Figura 5 – Carta degli spostamenti osservati con InSAR a Lamosano da ottobre 2004 a giugno 2005 (a meno di ambiguità di fase).

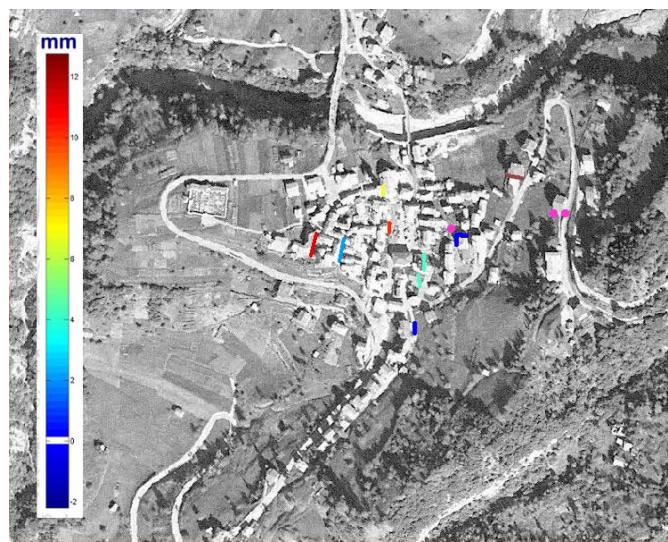


Figura 6 – Mappa degli spostamenti rilevati con TLS Leica a Lamosano da ottobre 2004 a giugno 2005. Cerchietti: punti di vista delle scansioni.

Le osservazioni con TLS, sia Optech, sia Leica, sono state eseguite in ottobre 2004 e giugno 2005. Per quanto riguarda il Leica (strumento a medio range), ciascuna sessione si è articolata su tre scansioni, eseguite su 360°, con tre punti di vista diversi (fig. 6) e registrate mediante modellazione ICP di edifici nelle aree di sovrapposizione. Le due nuvole di punti complessive così ottenute sono state sovrapposte mediante modellazione ICP su un edificio centrale, rispetto al quale sono stati considerati i movimenti. Poiché i riferimenti topografici stabili sono risultati fermi rispetto a tale edificio (che dunque va considerato fermo entro le incertezze di modellazione, quantificabili

mediamente in 3 mm), i moti evidenziati possono considerarsi assoluti. Questi sono stati stabiliti mediante modellazione di piani facilmente individuabili, quali muri, terrazze o serbatoi. Le sessioni osservative con InSAR sono state tre (giugno 2004, ottobre 2004 e giugno 2005). Gli edifici si sono inoltre rivelati essere riflettori molto adatti al radar, con coerenza mantenuta per un anno.

In gran parte del centro abitato il moto annuo osservato non supera 1 cm; entrambe le tecniche forniscono risultati paragonabili, anche perché la direzione del moto evidenziata da TLS e GPS quasi coincide con la linea di vista dell'InSAR, il cui punto di vista era stato scelto in funzione di ciò. In un'area limitata ad est il moto annuo è di 2.5 cm ed ha direzione quasi ortogonale a quella del resto dell'abitato; il risultato è evidenziato solo da TLS e GPS perché detta area non è stata monitorata con InSAR. Parte del paese non ha invece mostrato movimenti rilevabili. I risultati sono illustrati nelle figure 5 e 6, da cui può evincersi un sostanziale accordo tra le due tecniche utilizzate. Notare che, grazie al TLS, si può affermare che i risultati del radar non soffrono di ambiguità. Nel periodo giugno 2004/ottobre 2005 non è stato evidenziato alcun movimento (dunque inferiore ad 1 mm, risoluzione dell'InSAR): trattandosi di un periodo di relativa assenza di precipitazioni, se ne deduce una loro rilevanza nella dinamica del fenomeno.

## Conclusioni

La sperimentazione congiunta ha evidenziato come TLS e InSAR abbiano un forte carattere di complementarità. In particolare, sono state identificate differenti scale spazio-temporali per le due tecniche; il TLS acquisisce dati su deformazioni centimetriche e permette la creazione di modelli digitali dell'osservato. L'InSAR ha dimostrato di essere in grado di percepire spostamenti da 0.1 a 1 mm durante intervalli brevi (ore, giorni), con la possibilità di eseguire un monitoraggio continuo anche per più giorni, ma fornisce dati affetti da ambiguità di fase nel caso di osservazioni multitemporali di fenomeni rapidi e non consente la creazione di modelli ad alta risoluzione. Entrambe le tecniche richiedono un complesso processamento remoto dei dati acquisiti.

L'integrazione delle due strumentazioni è un approccio in grado di sfruttarne le caratteristiche e nel contempo di superarne i limiti, da cui la costruzione di un quadro completo della geometria e delle caratteristiche cinematiche di un versante instabile; ad esempio, il TLS può essere utilizzato per la creazione di DTM molto accurati su cui proiettare i dati provenienti da osservazioni InSAR. E' quindi ipotizzabile l'utilizzo delle due tecniche interfacciate per la predisposizione di un efficace ed efficiente sistema di monitoraggio-allarme, che potrebbe costituire uno strumento utile ai fini della mitigazione del rischio idrogeologico.

## Bibliografia

- Axelsson, P. (1999), "Processing of laser scanner data. Algorithms and applications", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, pp. 138-147
- Besl, P.J., McKay, N.D. (1992), "A method for registration of 3-D shapes", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14 (2), pp. 239-256
- Golden Software (2005), sito web <http://www.goldensoftware.com/> (ultimo accesso: 19.08.2005)
- Innovmetric (2005), sito web <http://www.innovmetric.com/> (u.a.: 19.08.2005)
- Leica (2005a), sito web <http://www.leica.loyola.com/products/hds/cyclone.html> (u.a.: 22.08.05)
- Leica (2005b), sito web <http://hds.leica-geosystems.com/> (u.a.: 18.08.2005)
- Optech (2005), sito web <http://www.optech.on.ca/> (u.a.: 18.08.2005)
- Squarzoni, C. (2003), *Mesure des champs de déplacement de surface et modélisation numérique des glissements des terrains*, Tesi di Dottorato Université Claude Bernard Lyon 1
- Tarchi, D., Casagli, N., Fanti, R., Leva, D., Luzi, G., Pasuto, A., Pieraccini, M., Silvano, S. (2003), "Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy", *Engineering Geology* 68, pp. 15-30
- Teza, G., Galgaro, A., Genevois, R., Rocca, M., Squarzoni, C. (2004), "Integrazione di dati da laser scanner e metodi tradizionali per la misura delle deformazioni della frana di Perarolo di Cadore (Bl)", In *Atti dell'8ª Conferenza Nazionale Asita*, pp. 1881-1886.