

# MONITORAGGIO DI FENOMENI DI DISSESTO NATURALE MEDIANTE ELABORAZIONE IN TEMPO REALE D'IMMAGINI

Giorgio LOLLINO(\*), Paolo ALLASIA(\*), Cristina RIVAROSSA(\*),  
Sandra DENASI(\*\*), Giorgio QUAGLIA(\*\*)

(\* IRPI CNR, Strada delle Cacce, 73. 10135 Torino. {paolo.allasia, giorgio.lollino, cristina.rivarossa}@irpi.cnr.it

(\*\* INRIM, Strada delle Cacce, 91. 10135 Torino. {denasi, quaglia}@inrim.it

## Sommario

L'articolo proposto descrive l'attività sperimentale volta a valutare le prestazioni di tecnologie video e di elaborazione immagini per misurare in tempo reale piccoli movimenti di superficie in aree soggette a dissesto geo-idrologico. Le tecnologie basate sull'elaborazione di immagini riprese da una telecamera consentono misure di movimento senza interventi in corpo frana. Il sistema proposto utilizza bersagli naturali (rocce, licheni, ecc.) come elementi di riferimento per misurare eventuali spostamenti mediante il confronto di immagini successive. Un sistema sperimentale è stato installato presso la stazione di monitoraggio del CNR-IRPI presso la frana di Gardiola in Val Germanasca (Torino). Utilizzando una telecamera BN progressiva, con un sensore CCD di 640 x 480 pixel di 7.4 x 7.4  $\mu\text{m}$  ed equipaggiata con un teleobiettivo di focale pari a 300 mm si è verificato che il sistema è in grado di misurare spostamenti di qualche mm usando semplici riferimenti naturali (licheni, rocce). Queste prestazioni hanno permesso di evidenziare uno spostamento dell'area monitorata di circa 75 mm avvenuto tra il 12 e 23 dicembre 2004 in pieno accordo con le misure effettuate dalla stazione totale. Attualmente, allo scopo di estendere l'area monitorata e migliorare le prestazioni fornite dal sistema si è provveduto ad una completa robotizzazione della telecamera installando una movimentazione per brandeggiare orizzontalmente e verticalmente il sistema di ripresa ed è stato sviluppato un nuovo algoritmo per la misura degli spostamenti basato sull'identificazione automatica di punti caratteristici dell'immagine invarianti all'illuminazione.

## Abstract

The proposed paper describes an experiment to check the performances of video technologies to measure, in almost real time, small movements of some peculiar patches of a landslide area. Video and image technologies are very challenging, because they allow non contact measurements and the proposed system make use of natural features (rocks, lichens, etc.) as reference points to detect motion from the comparison between succeeding images. An experimental set has been installed at the IRPI-CNR Gardiola monitoring station (Val Germanasca). Using a progressive BW camera, whose CCD sensor has 7.4 $\mu\text{m}$  x 7.4 $\mu\text{m}$  pixel size, and a telelens of 300mm focal length, we checked that the system is able to detect movements of few millimeter using simple natural targets. These performances allowed the measure of a shift of about 75 mm, in accordance with the measures of the total station, occurred between the 12th and 23th of December 2004. Presently, in order to extend the exploration to the whole area of the landslide and to improve the performances of the detection algorithm, the TV camera has been equipped with two pan & tilt rotational stages and the measure procedure has been updated introducing a new algorithm for the automatic detection of points invariant to lighting changes.

## Introduzione

Il monitoraggio ambientale in tempo reale riveste una particolare importanza nella prevenzione del rischio geo-idrologico, in particolare qualora si tratti di analizzare il comportamento di aree soggette a dissesti potenzialmente pericolosi. Si descrive in questo articolo una sperimentazione volta a valutare le prestazioni di un sistema di monitoraggio basato sull'acquisizione ed elaborazione di immagini

ni riprese da una telecamera con lo scopo di misurare piccoli spostamenti di aree soggette a movimenti franosi. Le tecniche attualmente più diffuse per il monitoraggio di movimenti di superficie sono basate principalmente su stazioni totali, su tecniche di rilevamento satellitare GPS e su sistemi di misura mediante laser a scansione terrestre o aviotrasportato. Le prime, nel campo del monitoraggio, comportano l'installazione di una serie di prismi riflettori e consentono pertanto misurazioni in un numero limitato di punti che devono essere necessariamente accessibili sia per il primo posizionamento che per la necessaria manutenzione del riflettore. Le tecniche di geodesia satellitare consentono analogamente ai sistemi basati su stazioni totali, misurazioni su un numero limitato di punti e sono particolarmente indicate per monitoraggi discontinui di alta precisione a causa principalmente degli elevati costi di una installazione fissa. Per quanto concerne i sistemi a scansione laser, attualmente non sono ancora indicati per il monitoraggio in continuo a causa di una serie di difficoltà legate principalmente al processamento automatico dei dati ma anche alla precisione e ripetibilità delle misure.

Un approccio basato sull'elaborazione di immagini riprese da una telecamera riveste pertanto un grande interesse, perchè permette misure senza contatto con l'oggetto da misurare, analizzando una serie di punti caratteristici sull'immagine individuati su acquisizioni digitali riprese in istanti diversi. Conoscendo i parametri di calibrazione del sistema di acquisizione immagini (telecamera + scheda di acquisizione) le componenti orizzontali e verticali di un eventuale scorrimento  $S$  possono essere misurate valutando il corrispondente scorrimento  $S_m$  sull'immagine dalla relazione  $S = S_m \cdot Z/f$ , dove  $Z$  è la distanza del punto da misurare ed  $f$  è la lunghezza focale dell'obiettivo della telecamera. A partire dal 2003 si è iniziata una sperimentazione per verificare le prestazioni di una telecamera come sistema di monitoraggio usando come punti di riferimento le strutture naturali fisse esistenti sul terreno (rocce, massi, pietraie).

### Il fenomeno di dissesto di Gardiola

A seguito delle intense precipitazioni e delle particolari condizioni meteorologiche verificatesi tra il 13 e il 16 ottobre 2000, i bacini del Piemonte nord-occidentale sono stati interessati da fenomeni diffusi di piena fluviale, torrentizia e di frana. In particolare, tale evento alluvionale ha provocato l'attivazione di un fenomeno franoso lungo il versante sinistro della Val Germanasca (Piemonte occidentale), nel territorio comunale di Salza di Pinerolo, tra le progressive Km 14+800 e Km 15+000. Il rilievo sull'area instabile, ha messo in risalto l'esistenza di un'ampia area di frana coinvolgente sia il tratto di strada citato sia i settori di versante immediatamente più a ovest e più ad est. La morfologia e le dimensioni dell'area instabile potevano inoltre portare, in caso di collasso, allo

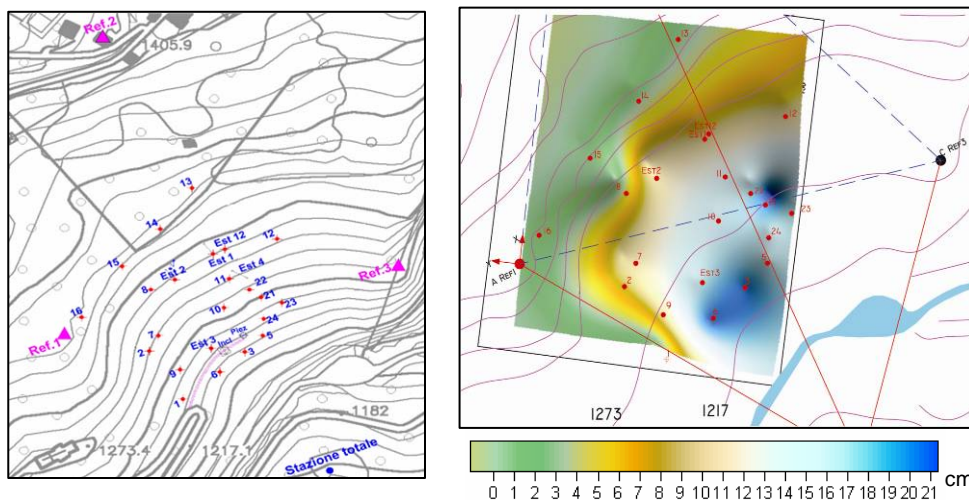


Figura 1: Sistema di prismi monitorati dalla stazione totale e rappresentazione grafica areale interpolata dell'entità degli spostamenti in cm, da Marzo 2004 a Maggio 2006.

sbarramento del fondovalle. Si manifestava quindi, l'urgenza di controllare in continuo l'evoluzione del fenomeno per individuare le possibili azioni per la mitigazione del rischio. Al fine di monitorare l'andamento del fenomeno di dissesto, sul versante opposto a quello oggetto di studio è stata installata una stazione totale servoassistita di precisione con sistema automatico di collima-

zione, il tutto alloggiato in un abitacolo di protezione. In accoppiamento al sistema topografico con lo scopo di garantire continuità di monitoraggio anche in condizioni climatiche avverse (pioggia, nebbia, neve etc...), si è provveduto ad installare 4 estensimetri a filo a funzionamento automatico alimentati da pannello solare e batteria tampone. Il monitoraggio, a tutt'oggi funzionante, ha fornito eccellenti risultati e nel tempo è stato integrato con nuove apparecchiature per il monitoraggio dei movimenti profondi e delle oscillazioni di falda. Grazie al funzionamento in continuo (cicli di misura mediamente ogni 3÷4 ore) ed alla elevata precisione della strumentazione e dei metodi di calcolo utilizzati, è stato possibile effettuare una serie di correlazioni tra eventi meteorologici e riattivazione dei movimenti (Lollino et al., 2005a). Inoltre, grazie ad una approfondita analisi delle misurazioni topografiche sono stati rilevati alcuni movimenti del versante opposto a quello di Gardiola già classificato come fenomeno franoso quiescente nel progetto IFFI. Tali risultati hanno creato non pochi problemi nell'interpretazione dei risultati ed hanno indotto il CNR-IRPI a creare una serie di applicativi ad hoc per la gestione delle misure topografiche del sito di Gardiola.



Figura 2: Telecamera

### Apparecchiatura sperimentale con telecamera fissa

Inizialmente è stata installata una telecamera all'interno della stazione allestita dall'IRPI per monitorare il movimento franoso di Gardiola. La telecamera è stata posizionata a fianco della stazione totale robotizzata ed è stata orientata in modo da inquadrare una zona in corrispondenza di un prisma riflettore per confrontare le misure effettuate dai due strumenti. Successivamente è stata acquisita, ad intervalli regolari, una lunga sequenza di immagini di questa zona dall'alba al tramonto, in diverse condizioni meteorologiche e di illuminamento. Questa sequenza è stata usata



Figura 3 : Bersagli

per studiare e sperimentare algoritmi atti ad individuare punti caratteristici il più possibile invarianti all'illuminazione da usare come riferimenti per la misura di eventuali spostamenti. L'analisi statistica di tutta la sequenza ha permesso di individuare alcune regioni con caratteristiche di invarianza all'illuminazione. Una di queste regioni è stata scelta come riferimento per la misura degli eventuali spostamenti nelle immagini successive. Lo spostamento è stato misurato calcolando, mediante correlazione all'interno di una corrispondente area di ricerca, la miglior sovrapposizione della regione di riferimento in ciascuna immagine successiva. Al fine di rendere la ricerca più raffinata ed il più possibile indipendente dall'illuminazione si è operato sulle differenze di luminosità e quindi sui punti di contorno. È stata usata una telecamera Sony XC-55 (figura 2) con sensore CCD B/N (formato: 1/3", 640 × 480 pixels di dimensioni 7.4×7.4 μm) corredata di un obiettivo fotografico NIKKOR di lunghezza focale 300 mm (equivalente a 2150 mm nel formato 35 mm). La taratura del sistema è stata effettuata direttamente sul luogo di monitoraggio usando alternativamente come riferimenti due bersagli artificiali posti su una tavola micrometrica per spostamenti verticali. Il primo, molto preciso, consisteva in una corona circolare nera su uno sfondo bianco, mentre il secondo simulava un bersaglio più naturale non molto ben definito simile ad una macchia di lichene su

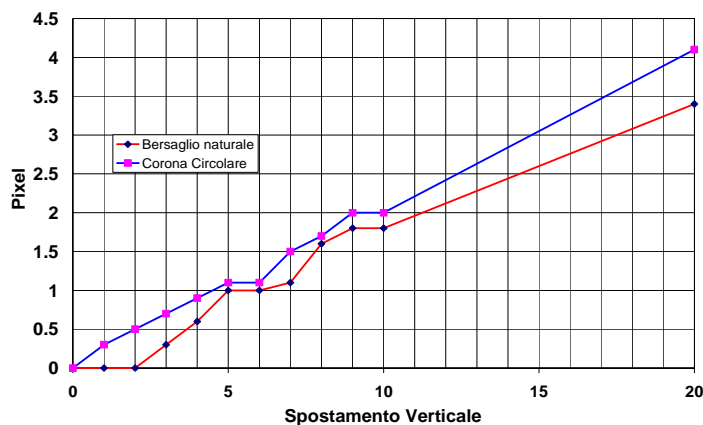


Figura 4: Taratura sistema di misura

una roccia (figura 3). Impostati scorrimenti verticali tra 0,01 e 0,1 m, è stata effettuata la misura con il metodo su descritto. I risultati sono riportati nei grafici di figura 4, in base ai quali si ricava che alla distanza di 170 m lo spostamento di 1 pixel sull'immagine corrisponde a 4.5 mm sulla scena e la zona inquadrata risulta di 2.8 m × 2.1 m. Ipotizzando una incertezza massima di un decimo di pixel nella misura dello spostamento  $S_m$  sull'immagine, si può ragionevolmente pensare di avere, in condizioni ottimali, una incertezza di 1 mm nella misura della componente orizzontale o verticale

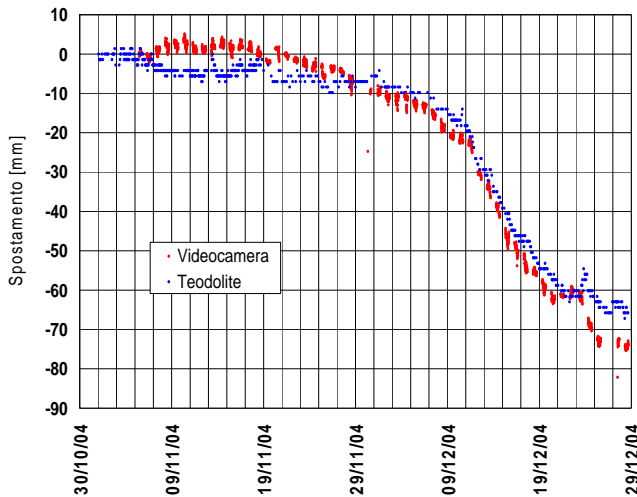


Figura 5: Movimento Dicembre 2004

dello spostamento  $S$ . Questo primo sistema di osservazione è stato in funzione per tutto il 2004 e 2005 ed i risultati iniziali sono stati confortanti, anche se si sono dovuti risolvere alcuni problemi legati all'instabilità del supporto della telecamera a causa delle variazioni di temperatura e, soprattutto, di microspostamenti del basamento sul quale è stata installata l'apparecchiatura, (plinto in Calcestruzzo Armato 1×1×0.5 m). Tenuto conto di questa anomalia, confermata anche da misure comparate effettuate con stazione totale e con tecniche di geodesia satellitare GPS, il sistema ha permesso, dopo le opportune correzioni del caso, la misura di uno spostamento di circa 0.075 m avvenuto alla

### Apparecchiatura sperimentale con telecamera brandeggiabile

La necessità di compensare automaticamente gli errori dovuti ai microspostamenti del sistema di misura ha imposto di effettuare misure di spostamento non più assolute rispetto al telecamera ma relative rispetto ad un punto stabile situato in prossimità della zona soggetta a movimento. Questo comporta la necessità di osservare una coppia di punti in rapida successione puntando la telecamera alternativamente sul punto stabile e sul punto in esame. Questa operazione è stata resa possibile installando la telecamera su una movimentazione costruita utilizzando una coppia di tavole rotanti montate ad angolo retto in grado di consentire movimenti di brandeggio orizzontali e verticali (figura 6). Questa possibilità di orientare la telecamera ha consentito l'osservazione dell'area instabile in più punti, ampliando così l'area di monitoraggio. Al fine di mantenere le prestazioni del sistema allo stesso livello della telecamera fissa si è imposto come requisito essenziale per le tavole rotanti una incertezza nella ripetibilità del posizionamento inferiore a  $0.001^\circ$  per consentire con l'ottica a disposizione un errore massimo in misure a 250 metri dell'ordine di 0.005 m (un'incertezza di 0.005 m a 250 m richiede una ripetibilità inferiore a  $0.00115^\circ$ , qualora si desideri una incertezza di 0.001 m a 250 m la ripetibilità dovrebbe essere inferiore a  $0.00023^\circ$ ). La movimentazione è stata realizzata utilizzando una coppia di tavole rotanti MICOS mod. PRS-110 che garantiscono una risoluzione ed una ripetibilità entro  $0.0002^\circ$ . Non interessa la precisione in quanto è importante analizzare in tempi successivi esattamente sempre la stessa zona. Per consentire l'analisi di più zone di interesse si è provveduto ad automatizzare la procedura per l'individuazione dei punti di riferimento. Si è deciso, pertanto, di usare tutta l'area inquadrata dalla telecamera come zona di osservazione e di utilizzare l'algoritmo SIFT (Shift Invariant Feature Transform) sviluppato da Lowe (Lowe, 1991) per l'estrazione di punti carat-

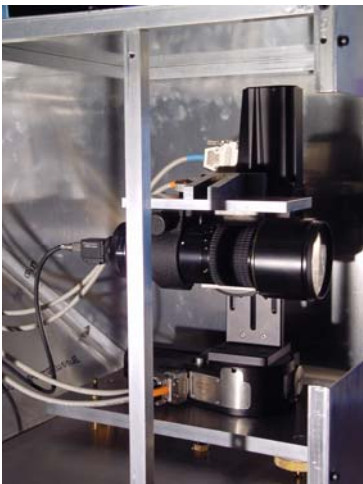


Figura 6: Telecamera brandeggiabile

te. Non interessa la precisione in quanto è importante analizzare in tempi successivi esattamente sempre la stessa zona. Per consentire l'analisi di più zone di interesse si è provveduto ad automatizzare la procedura per l'individuazione dei punti di riferimento. Si è deciso, pertanto, di usare tutta l'area inquadrata dalla telecamera come zona di osservazione e di utilizzare l'algoritmo SIFT (Shift Invariant Feature Transform) sviluppato da Lowe (Lowe, 1991) per l'estrazione di punti carat-

teristici invarianti all'illuminazione, alle rotazioni ed alle variazioni di scala. A ciascun punto è associato un descrittore basato sulle proprietà fotometriche dei punti circostanti che lo rende altamente distinguibile, perciò particolarmente adatto per trovare le corrispondenze tra punti simili in immagini successive e quindi valutarne gli eventuali spostamenti. La valutazione dello spostamento viene effettuata cercando la corrispondenza tra i punti caratteristici nelle differenti immagini e mediando gli spostamenti misurati su ciascun accoppiamento. Poiché il numero dei punti caratteristici individuati dall'algoritmo è elevato e numerosi sono i punti per ogni immagine su cui effettuare le misure, la

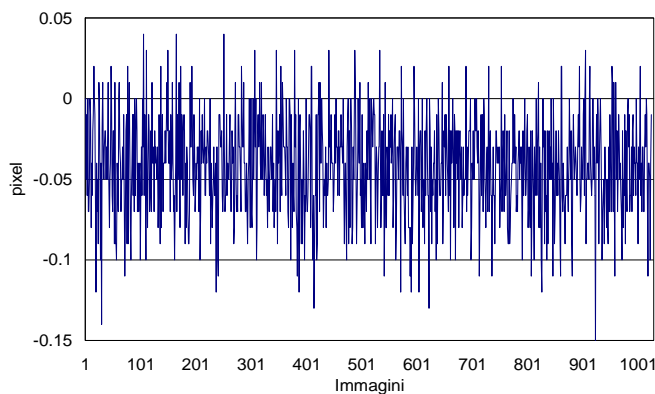


Figura 7: *Errore dell'algoritmo di Lowe*

valutazione dello spostamento complessivo dovrebbe essere di gran lunga migliore rispetto al caso della telecamera fissa. La procedura di monitoraggio è stata pertanto così articolata. In una fase iniziale sono state individuate le zone da analizzare (il più possibile in corrispondenza dei prismi riflettori usati per la misura con la stazione totale) e sono state acquisite le immagini di riferimento e calcolati i rispettivi punti caratteristici. Successivamente si sono analizzate in sequenza e ad intervalli regolari queste stesse zone, estraendo per ciascuna di esse i rispettivi punti caratteristici, che per confronto con le immagini di riferimento, hanno permesso la misura degli spostamenti. Eventuali discordanze nella misura delle zone instabili rispetto a quelle effettuate in corrispondenza delle zone stabili sono imputate a oscillazioni della stazione e sono utilizzate per compensare le misure. Attualmente il sistema funziona con luce diurna, ed acquisisce immagini ad intervalli di 30 minuti, dalle ore 9 alle 17.30.

## Risultati

Le prestazioni del sistema dipendono da una somma di incertezze che si vanno accumulando nella catena di misura, essenzialmente errori di puntamento della telecamera ed errori di individuazione e di abbinamento dei punti caratteristici. L'algoritmo è stato valutato in laboratorio analizzando una sequenza di immagini riprese in condizioni ottimali (bersaglio e telecamera montati su banco ottico con illuminazione costante). In questo caso l'errore risultante è stato inferiore al decimo di pixel come illustrato in figura 7. Anche il comportamento della movimentazione è stato valutato in laboratorio analizzando sequenze di immagini acquisite puntando la stessa scena a partire da posizioni iniziali qualsiasi. Successivamente sono state analizzate sequenze di immagini reali di un'area fissa della frana per verificare la influenza della turbolenza atmosferica. La figura 8 riporta i risultati ottenuti. Le variazioni riscontrate sono attribuibili al battimento tra la frequenza di campionamento e la stabilità dei sincronismi della telecamera. Questo inconveniente potrà essere superato sostituendo l'attuale telecamera analogica con una digitale. Nella figura 9 sono riportati i risultati ricavati su una sequenza di immagini riprese dal 30.09 al 30.10.2006 in corrispondenza del prisma CP6. Il risultato complessivo è soddisfacente anche se è particolarmente evidente una fluttuazione delle misure nell'arco della giornata. Questa variazione è regolare ed è imputabile alla differente individuazione dei punti caratteristici al variare della in-

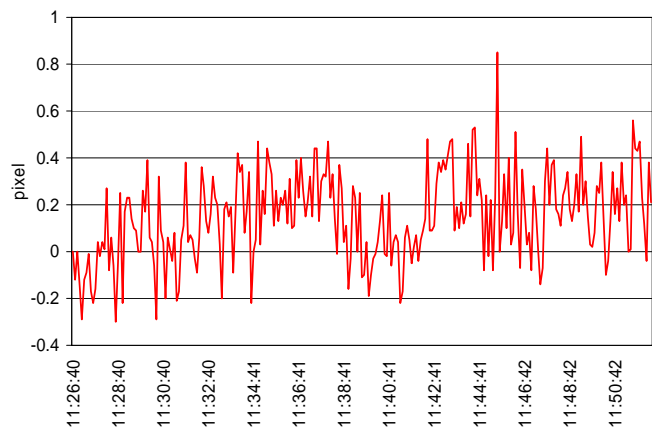


Figura 8: *Influenza della turbolenza atmosferica*

fluttuazione delle misure nell'arco della giornata. Questa variazione è regolare ed è imputabile alla differente individuazione dei punti caratteristici al variare della in-

clinazione della sorgente luminosa (sole) ed è tanto più evidente quando il cielo è sereno e quanto più è disomogenea la zona in esame. Qualora, però, siano sufficienti valori medi giornalieri, il confronto con le misure effettuate su regioni invarianti riprese con la telecamera fissa e selezionate singolarmente in funzione della invariabilità all'illuminazione risulta più che soddisfacente. La figura 10 riporta invece le misure effettuate tra il 25.4 ed il 7.5.2007 sempre in corrispondenza del prisma 6. E' evidente in questo caso un crollo localizzato in corrispondenza di questo prisma a seguito di lavori di consolidamento e di drenaggio effettuati in zona frana.

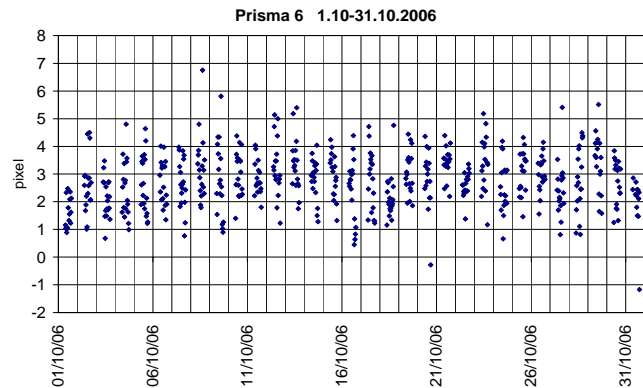


Figura 9: Misure su Prisma 6

### Conclusione

In questa fase iniziale è stata prevista la sperimentazione solo durante le ore di luce, ma l'uso di telecamere dotate di una maggiore sensibilità e risoluzione potrebbe estendere l'applicazione del sistema alle ore notturne e migliorarne le prestazioni soprattutto per quel che riguarda l'accuratezza. In base ai risultati sin qui ottenuti, si può affermare che l'apparecchiatura proposta può ragionevolmente integrare o sostituire in situazioni di emergenza una equivalente apparecchiatura basata sul laser scanner tenuto conto della semplicità di uso e di installazione nonché del costo contenuto delle apparecchiature utilizzate. Attualmente gli studi sono concentrati a risolvere il problema delle fluttuazioni giornaliere nella estrazione dei punti caratteristici

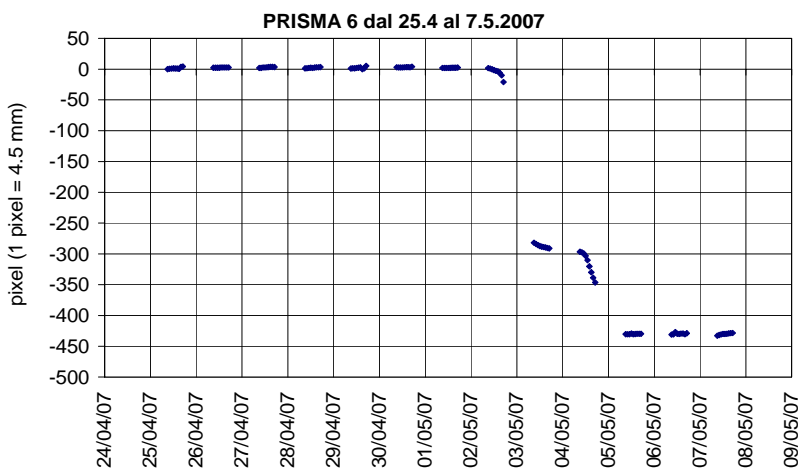


Figura 10: Misura di un crollo verificatosi durante lavori di drenaggio in corpo frana

per effetto della rotazione terrestre intorno al sole, in particolare sono previste ulteriori indagini a livello di elaborazione del segnale per ridurre o quantomeno compensare tali effetti.

### Riferimenti bibliografici

- Lollino G., Allasia P., Baldo M., Giordan D., Rivarossa C.(2005a), "Gardiola landslide (Piedmont-Italy): Monitoring in continuous of landslides phenomena for a better management of natural disasters", *International Symposium on latest natural disasters - new challenges for engineering geology, geotechnics and civil protection*, 5-8 September 2005, Sofia Bulgaria.
- Lollino G., Allasia P., Rivarossa C., Quaglia G., Denasi S.(2005b), "Monitoring of superficial movements in landslide area: comparison between traditional and innovative technologies", *Atti di Geotitalia 2005, Quinto Forum Italiano di Scienze della Terra, Spoleto, 21-23 Settembre 2005*.
- Lowe, D.G.(2004), "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints", *Intern. Journ. on Computer Vision*(60), No. 2, Novembre 2004.