

FOTOGRAMMETRIA DIGITALE PER IL MONITORAGGIO DEGLI SPOSTAMENTI DI VERSANTI INSTABILI

Antonio Pol (antonio.pol@phd.unipd.it), Lorenzo Brezzi, Stefania Ceccato, Fabio Gabrieli, Simonetta Cola
Università degli studi di Padova, Dipartimento ICEA

Gloria Lorenzetti
M3E srl, Padova

ABSTRACT. Nell'ambito della prevenzione e riduzione del rischio geotecnico il monitoraggio di zone suscettibili a fenomeni di instabilità riveste sempre più un ruolo fondamentale. In questo lavoro è presentata una tecnica fotogrammetrica per il monitoraggio degli spostamenti in aree di frana. Tale tecnica permette la ricostruzione del campo degli spostamenti superficiali a partire da una sequenza di immagini digitali raccolte da una postazione fissa in un certo lasso temporale. Nel seguito verrà brevemente introdotta la procedura di questo metodo con riferimento ad un caso pratico: il monitoraggio del bacino di alimentazione della frana del Tessina, una colata di fango e terra attiva dagli anni 60 nel comune di Chies d'Alpago (Belluno).

1. INTRODUZIONE

In ambito geotecnico, i fenomeni di instabilità di versante rappresentano uno dei maggiori rischi per la sicurezza della popolazione. Essi, infatti, sono scarsamente prevedibili a causa della complessità dell'insieme dei fattori di innesco, ed in alcuni casi difficilmente mitigabili a causa dei grandi volumi in gioco. Nel caso di frane che coinvolgono grandi masse o che evolvono con cinematismi molto complessi, la difficoltà di attuare soluzioni di controllo e mitigazione, mediante sistemi di abbattimento delle pressioni interstiziali e di regimazione delle acque (drenaggi, pozzi) o attraverso interventi strutturali di rinforzo (ancoraggi, barriere rigide o deformabili, ecc.), porta alla conseguente necessità di realizzare degli affidabili ed efficienti sistemi di allerta basati sul monitoraggio continuo delle zone instabili. Le operazioni di monitoraggio, oltre ad essere fondamentali per poter tarare modelli previsionali di spostamento, risultano utili sia in fase progettuale che dopo la realizzazione di eventuali interventi di stabilizzazione, al fine di valutare l'efficienza e l'efficacia degli interventi stessi.

In un fenomeno franoso i principali oggetti del monitoraggio sono il regime della falda e il campo degli spostamenti. Il monitoraggio del regime della falda si rende necessario laddove il fenomeno d'instabilità sia legato all'aumento delle pressioni interstiziali; tuttavia, esso non è sempre attuabile (per difficoltà di accesso al sito o vastità e complessità dell'area) o facilmente interpretabile (per eterogeneità del sottosuolo e presenza di più falde). Il monitoraggio degli spostamenti è invece assolutamente necessario per valutare la geometria delle masse instabili ed il grado di attività delle diverse porzioni di frana. Le tecniche di monitoraggio degli spostamenti sono molteplici: in ordine di complessità e di costo, si passa dai metodi topografici tradizionali con teodolite, al Real Time Kinematic GPS, alla stazione totale fino al Laser Scanner, al rilievo da satellite o da aeromobile a pilotaggio remoto (APR). La fotogrammetria, specialmente quella terrestre, rappresenta invece un sistema di monitoraggio degli spostamenti a basso costo, *denso e distribuito*: denso perché idealmente ad ogni pixel dell'immagine può essere associata un'informazione di spostamento (nuvola di punti e di vettori spostamento), distribuito perché questa informazione è ottenibile su una inquadratura anche molto estesa e quindi senza dover decidere in anticipo i punti da monitorare.

2. FOTOGRAMMETRIA TERRESTRE

La ricerca nel campo della fotogrammetria ha avuto di recente un importante progresso grazie alla diffusione di tecnologie di ripresa foto e video digitali a basso costo ed agli avanzamenti nel campo dell'elaborazione di immagini digitali. Essa viene spesso associata alla sola possibilità di ricostruzione tridimensionale di oggetti e di superfici, ma le sue potenzialità si estendono anche alla misura degli spostamenti. È possibile distinguere la fotogrammetria da satellite e da aeromobile, sviluppata nel campo del rilievo topografico, da quella terrestre (close-range photogrammetry), che basa la ricostruzione 3d delle superfici su un modello ideale di fotocamera stenoscopica, con raggi ottici convergenti verso un unico centro ottico (Hartley e Zisserman, 2003). In questo lavoro la close-range photogrammetry è usata per ricostruire la superficie del bacino di alimentazione della frana del

Tessina attraverso più prese fotografiche (più inquadrature). Successivamente, mediante l'uso di un algoritmo di digital image correlation si è determinato il campo degli spostamenti e con uno di triangolazione si sono proiettati gli spostamenti dal piano dell'immagine allo spazio tridimensionale.

3. APPLICAZIONE DEL MONITORAGGIO FOTOGRAMMETRICO ALLA FRANA DEL TESSINA

Al fine di testare questa nuova tecnica al caso della frana del Tessina sono state usate due fotocamere reflex digitali Canon EOS 550D, posizionate con inquadrature convergenti all'interno di due scatole stagne e controllate da un pc posto in adiacenza. Lo schema di cablaggio dei vari componenti del sistema di acquisizione è rappresentato in Figura 1. Ciascuna fotocamera ha acquisito ogni giorno una foto della frana ad altissima risoluzione (18 MPx), per tre anni circa (dal 2011 al 2014), inviando da remoto la conferma dell'evento di scatto. La scarsa copertura GSM non ha permesso l'invio in automatico da remoto delle immagini né tantomeno il controllo da remoto del sistema di acquisizione.

In seguito al trasferimento delle immagini, si è operata una prima selezione scartando, grazie all'applicazione di un filtro automatico, le foto non utilizzabili per presenza di nebbia, o pioggia intensa, o eccessiva copertura nevosa. La fase di acquisizione delle sequenze in time-lapse è stata preceduta dalla cosiddetta "calibrazione interna" delle due fotocamere cioè la determinazione della risoluzione in pixel del sensore, della vera distanza focale e dei parametri di distorsione ottico-geometrici di ciascuna fotocamera per poter mettere in relazione la fotocamera reale con il modello ideale di fotocamera stenopeica. Questa fase di calibrazione è cruciale per la buona riuscita della ricostruzione e può essere eseguita in diversi modi: con l'ausilio di una scacchiera, con l'acquisizione di una serie di punti fiduciali nell'immagine (punti dei quali per esempio si conoscono con elevata precisione le coordinate GPS), o, ancora, con il calcolo delle corrispondenze da una serie di inquadrature convergenti dello stesso oggetto/superficie. In questo lavoro si è proceduto con una tecnica mista che parte dalle informazioni delle componenti della fotocamera fornite dalla casa costruttrice e arriva a ottimizzare i parametri di calibrazione attraverso l'uso di inquadrature convergenti della frana.

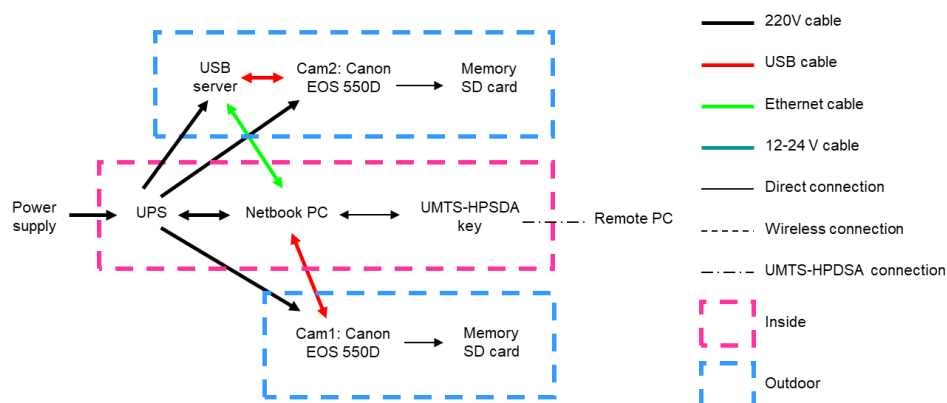


Figura 1. Schema di interconnessione usato per il sistema di monitoraggio.

3.1 Ricostruzione tridimensionale della superficie della frana

Inizialmente, sono state acquisite una ventina di immagini della frana riprese da più inquadrature convergenti (Figura 2a), comprese quelle ottenute dalle due postazioni fisse. Tutte le immagini sono state corrette della distorsione secondo i parametri ottenuti con la precedente calibrazione interna. Successivamente, attraverso il calcolo delle corrispondenze (cioè la ricerca dei punti omologhi su più inquadrature), sono state calcolate la posizione e la direzione relativa del centro e dell'asse ottico delle diverse pose, ciascuna idealizzata come fotocamera stenoscopica (Figura 2b). Si è pervenuti così alla "calibrazione esterna", con particolare riferimento alle due inquadrature fisse (C^2 e C^3 nella figura 2) utilizzate poi per il monitoraggio della frana.

Conoscendo la matrice di rotazione e traslazione relativa delle due inquadrature stenoscopiche convergenti si è potuto procedere alla rettificazione delle immagini (proiezione su di un piano comune) per ottenere una coppia stereoscopica (Figura 2c). Sfruttando il vincolo epipolare, è stato usato un algoritmo di digital image correlation per ottenere la mappa densa di disparità. Da quest'ultima, per triangolazione, è stata ottenuta la posizione nello spazio 3d di ciascun pixel della foto (Figura 2d) ovvero la nuvola di punti appartenenti alla superficie della frana.

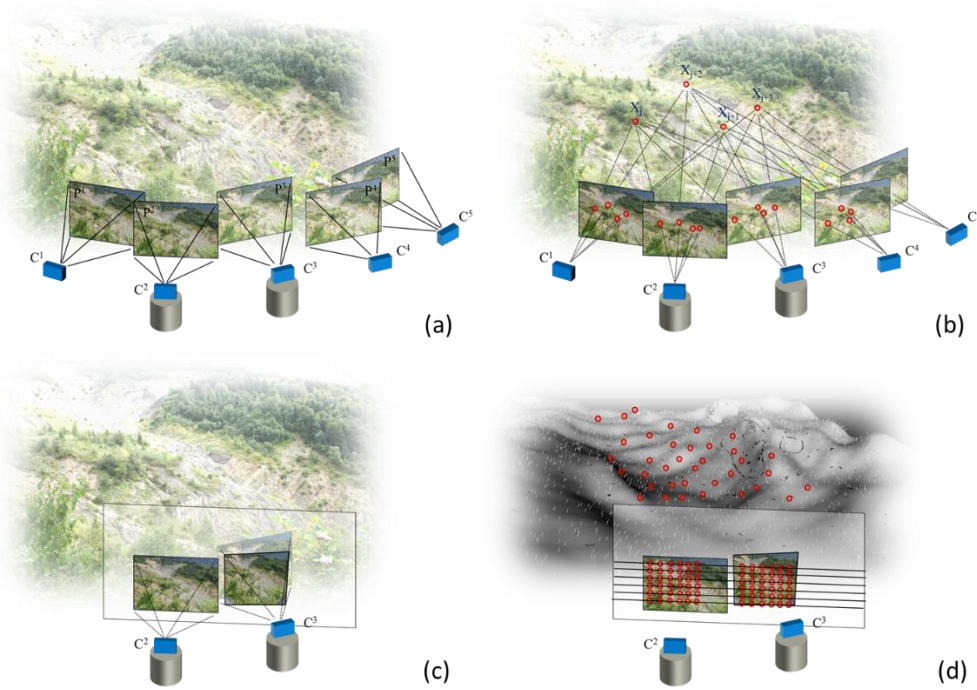


Figura 2. Schematizzazione della procedura di calibrazione e di ricostruzione della superficie 3d della frana: (a) acquisizione di n-pose della frana; (b) calcolo delle corrispondenze per la calibrazione esterna delle fotocamere; (c) rettificazione delle due inquadrature fisse; (d) ricostruzione 3d densa della superficie della frana tramite algoritmo di correlazione.

3.2 Ricostruzione tridimensionale del campo degli spostamenti della frana

Il campo degli spostamenti è stato ottenuto invece calcolando il flusso ottico direttamente sul piano delle immagini confrontando due immagini scattate in successione temporale e poi proiettandolo per triangolazione sulla superficie tridimensionale. Sul piano delle due immagini di destra e sinistra è stato applicato un algoritmo di flusso ottico denso Farneback (Farneback, 2003) che permette di modulare ed infittire la densità di vettori spostamento attraverso un'espansione polinomiale. Infine, i valori sono stati filtrati, proiettati sulla nuvola di punti della superficie della frana e filtrati nuovamente rimuovendo valori statisticamente anomali (Figura 3).

3.3 Considerazioni sulla precisione e l'accuratezza del metodo di misura

La precisione e l'accuratezza di questo metodo sono di difficile stima. Innanzitutto occorre distinguere gli errori commessi in fase di ricostruzione della superficie da quelli in fase di determinazione del flusso ottico.

In condizioni ideali, cioè immaginando che per ogni inquadratura non si modificano le condizioni di colore e luminosità dell'oggetto e considerando che la fase di calibrazione delle fotocamere e la ricerca delle corrispondenze avvenga senza errori, per quanto riguarda la ricostruzione 3d è possibile stimare un errore dipendente dalla risoluzione del sensore della fotocamera, dalla distanza di presa Z e dalla baseline b (distanza tra i due assi ottici delle fotocamere). La precisione dZ della distanza del punto dal piano dell'immagine può essere espressa in modo semplificato (Kytö et al., 2011) come:

$$dZ = \frac{Z^2}{fb} dp_x \tag{1}$$

dove dp_x è l'accuratezza della mappa di disparità e f è la lunghezza focale. Nel caso dell'applicazione alla frana del Tessino, considerando una distanza che varia tra 100 e 700 m, la precisione teorica varia da 20 cm a 4 m.

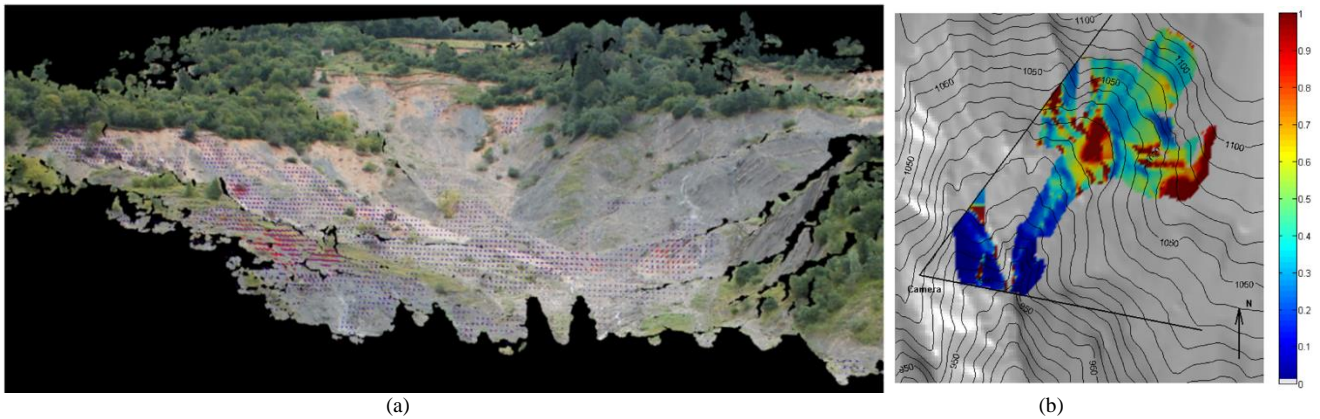


Figura 3. (a) applicazione del flusso ottico denso di Farneback alla sequenza di immagini della frana del Tessina dal 2 al 3 agosto 2014 e mappatura della GSD sull'area oggetto di indagine.

Per quanto concerne il flusso ottico la precisione teorica dipende dalla distanza, dalla direzione dello spostamento e dalle caratteristiche colorimetriche della superficie in movimento. Assume inoltre una importanza rilevante l'angolo di incidenza del asse ottico con la normale alla superficie. Il valore di precisione è riassumibile nella stima della cosiddetta Ground Sample Distance (Gabrieli et al., 2016):

$$GSD = \frac{Z \cdot IFOV}{\cos \theta} = \frac{Z \cdot 2 \cdot \tan^{-1} \left[\frac{p}{2f} \right]}{\cos \theta} \quad (2)$$

dove $IFOV$ è l'angolo di visuale istantaneo, p è la pixel size del sensore e θ è l'angolo di incidenza, ovvero l'angolo tra il raggio visuale incidente e la normale al piano in quel punto. In figura 3b è riportata la mappa della distribuzione di GSD sull'area inquadrata da una delle due fotocamere. Nel caso in esame la precisione media su tutta l'area inquadrata si attesta sui 0.4 m ma si osserva una grande variabilità a seconda della orientazione delle superfici.

4. CONCLUSIONI

Il metodo proposto costituisce una alternativa a basso costo per il monitoraggio in continuo di fenomeni di instabilità (es. frane, cave, fronti di scavo). Il grande vantaggio è rappresentato dalla possibilità di modulare la risoluzione temporale (attraverso video o sequenze fotografiche time-lapse, come in questo caso) e spaziale (con fotocamere reflex ma anche webcam o fotocamere di cellulari). Per la sua applicazione in sito sono richiesti una buona visibilità dell'area (scarsa copertura vegetata o innevata), almeno due inquadrature convergenti (preferibilmente laterali rispetto al movimento) e una superficie con elevata texturizzazione. I difetti di questo metodo sono rappresentati dalla impossibilità di effettuare un monitoraggio notturno e dalla dipendenza dalle condizioni meteo (nebbia, pioggia). In futuro sarà indispensabile valutare l'accuratezza e la precisione attraverso un confronto con altri sistemi di rilievo.

5. BIBLIOGRAFIA

- Farneback G. (2003). Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion. *Proceedings of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis*. Gothenburg, Sweden, 2003.
- Gabrieli F., Corain L., Vettore L. (2016). A low-cost landslide displacement activity assessment from time-lapse photogrammetry and rainfall data: Application to the Tessina landslide site. *Geomorphology*, 269: 56–74.
- Hartley R., Zisserman A. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Kytö M., Nuutinen M., Oittinen P. (2011). Method for measuring stereo camera depth accuracy based on stereoscopic vision. *Proc. of Conference SPIE/IS&T Electronic Imaging, Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement*, San Francisco Airport, California, United States, vol. 7864.