

## **Realizzazione di un sistema fotogrammetrico automatico per lo studio della dinamica evolutiva di un ghiacciaio pensile**

Fabrizio Diotri (\*), Riccardo Roncella (\*\*), Claudio Lucianaz (\*), Gianfranco Forlani (\*\*),  
Marco Vagliasindi (\*), Elena Motta (\*)

(\*) Fondazione Montagna sicura, Loc. Villard de La Palud 1, 11013 Courmayeur (AO)

Tel. 0165.897602, e-mail [fdiotri@fodnms.org](mailto:fdiotri@fodnms.org)

(\*\*) DICATeA Università di Parma Viale G.P. Usberti 181/a 43124 Parma

Tel. 0521 90592634, e-mail [riccardo.roncella@unipr.it](mailto:riccardo.roncella@unipr.it)

### **Riassunto**

I rischi ambientali in ambito glaciale hanno suscitato, negli ultimi anni, un notevole interesse mediatico e scientifico. Il ghiacciaio delle Grandes Jorasses (Courmayeur (AO)) è oggetto di studio da diversi anni poiché presenta una particolare criticità legata alla zona altamente frequentata sulla quale incombe. Tale ghiacciaio viene definito "pensile" per la sua collocazione su un pendio di roccia sul quale, per via della gravità tende a scivolare fratturandosi. Le fratture che si formano isolano porzioni di ghiaccio che, a seconda delle dimensioni, crollando potrebbero compromettere la sicurezza del fondovalle. Per tale ragione, si è deciso di realizzare un sistema fotogrammetrico automatico, per stimare la variazione della geometria del ghiacciaio, gli eventuali volumi potenzialmente instabili, e quindi approfondire la conoscenza sulla dinamica evolutiva dell'apparato. Il sito da monitorare presenta una serie di difficoltà non comuni: l'utilizzo di metodi di correlazione di immagine per la ricostruzione automatica del DSM richiede particolare cura per le condizioni radiometriche della superficie (prevalentemente innevata); la calibrazione del sistema ottico deve essere eseguita con grande attenzione così come devono essere valutati ed eventualmente tenuti in considerazione gli effetti sui parametri di orientamento interno e di distorsione degli effetti termici cui è sottoposta la camera (escursioni giornaliere anche di 40÷50°).

### **Abstract**

In the last years, a great concern is arising about natural risks in glacial environment. Grandes Jorasses glacier (Courmayeur – Aosta Valley – IT) is studied from several years as a critical case, as its dynamics may involve a highly frequented touristic area. Grandes Jorasses is defined as a hanging glaciers, as it lies on a steep rock slope on which it slides because of gravity. Sliding causes cracking of ice and fracturing into blocks and consequent icefalls. Should a large volume of ice be involved, or an avalanche triggered from the slope below the glacier, icefalls may reach the valley floor, so threatening people safety and buildings. In order to estimate geometrical variations and evaluate potential unstable volume, thus achieving a better knowledge of serac dynamic, an automatic photogrammetric system has been designed. Several troubles due to environmental conditions of this site have to be solved. First, because of the radiometric conditions of the surface, which is mostly snow-covered, image correlation methods used for DSM model reconstruction must be carefully evaluated, as well as the optical system calibration. Then, thermic influence on internal orientation and distortion, due to the wide temperature range (even 40 – 50 °C) to which the camera is subjected, must be taken into account.

## Introduzione

Il ghiacciaio sospeso delle Grandes Jorasses è situato lungo il versante sud delle Grandes Jorasses (Comune di Courmayeur, Valle d'Aosta, Italia) ad una quota compresa tra i 4.100 ed i 4.300 m s.l.m. ed insiste direttamente sul fondovalle della Val Ferret. Il ghiacciaio è caratterizzato da un evidente seracco (seracco Whympfer) dal quale si verificano periodici crolli di ghiaccio. A seconda del volume, i crolli sono potenzialmente in grado di raggiungere il fondovalle o, in presenza di manto nevoso sul pendio sottostante, di innescare valanghe di proporzioni rilevanti. (Margreth et al., 2010) Tali fenomeni sono in grado di creare importanti rischi per il fondovalle, che costituisce una zona a forte vocazione turistica e ricca di edifici ed infrastrutture.

Il ghiaccio poggia su di una superficie rocciosa inclinata di circa 35° che si raccorda con la valle sottostante; il dislivello tra il ghiacciaio ed il fondovalle è di circa 2.600 m s.l.m. A causa della geometria e della quota, la massa di ghiaccio che si forma per continuo accumulo e trasformazione della neve di precipitazione comporta necessariamente periodici crolli, che sono quindi da considerare un fenomeno naturale. Questo tipo di ghiacciaio, sulla base delle più recenti convenzioni glaciologiche, viene definito *unbalanced ramp avalanching glaciers* (ghiacciaio sospeso non bilanciato) ed il suo meccanismo di fratturazione *slab fracture* (movimento traslazionale di una placca lungo una superficie, Pralong e Funk, 2006).

La dinamica di questo tipo di ghiacciai è fortemente influenzata dalla geometria e dalle condizioni di densità e di temperatura dell'apparato glaciale. La continua variazione della morfologia del ghiacciaio, dovuta all'apertura di fessure ed al conseguente crollo di porzioni più o meno importanti dello stesso, è caratterizzata da un progressivo aumento della velocità di spostamento e dell'attività microsismica delle porzioni di ghiaccio instabili (Pralong e Funk, 2006). La misura delle velocità di spostamento tramite sistemi topografici costituisce attualmente il sistema più utilizzato per il monitoraggio e la previsione dei potenziali crolli.

A causa del potenziale rischio per il fondovalle, il ghiacciaio è oggetto di interventi di monitoraggio finalizzati alla protezione civile. Un primo intervento di monitoraggio fu realizzato tra il 1994 e il 1998 da parte del Prof. Martin Funk dell'ETH di Zurigo, su incarico della Regione Autonoma Valle d'Aosta, e permise di prevedere due crolli verificatisi tra il gennaio 1997 e il giugno 1998 (Margreth e Funk, 1999). Un intervento di monitoraggio è attualmente in corso, a partire dal gennaio 2009, da parte della Fondazione Montagna sicura su incarico della Regione Autonoma Valle d'Aosta, con la consulenza scientifica del prof. Martin Funk. Il sistema di monitoraggio si basa su misure di tipo topografico di prismi installati sulla superficie del seracco, eseguite da una stazione totale robotizzata, ed è finalizzato all'attività di protezione civile.

Parallelamente, nell'ambito del progetto ***GlaRiskAlp*** (**progetto semplice inserito del Programma Operativo "Alcotra"**, piano di cooperazione territoriale nell'area delle Alpi Latine, finanziato dalla Commissione Europea attraverso il FESR) Fondazione Montagna sicura quindi ha avviato una serie di azioni di studio volte ad approfondire la conoscenza del seracco e della sua dinamica mediante l'applicazione di tecniche innovative, nonché a sviluppare tecniche in grado di integrare le misure topografiche tradizionali. Tali attività comprendono un sistema di monitoraggio topografico sperimentale tramite una rete di ricevitori GPS, un sistema sperimentale di misura dell'attività sismica, misure termiche della roccia (a cura di ARPA Valle D'Aosta), rilievi fotogrammetrici da elicottero ed un sistema di fotogrammetria fissa oggetto del presente articolo.

I rilievi fotogrammetrici vengono attualmente eseguiti in caso di necessità in modalità *close-range* speditiva facendo uso dell'elicottero, dal quale è possibile riprendere il ghiacciaio da un punto di vista ottimale, e sono utilizzati per il calcolo dei volumi di ghiaccio potenzialmente instabili o crollati. La frequenza di acquisizione delle immagini ed il conseguente calcolo del modello tridimensionale non permettono, ad oggi, di seguire in continuo gli spostamenti e le evoluzioni morfologiche dell'apparato. Il lavoro presentato in questo articolo si propone di colmare tale lacuna realizzando un sistema fotogrammetrico autonomo in tutte le fasi, dall'acquisizione delle immagini, alla restituzione dei modelli tridimensionali dell'oggetto.



*Figura 1 – Vista panoramica del ghiacciaio pensile delle Grandes Jorasses. In evidenza, nella parte centrale del fotogramma, la crepa formatasi nella primavera del 2008. (Autore: F. Diotri).*

## **Il sistema di acquisizione**

### *Premessa*

La fotogrammetria terrestre in modalità *close-range* si è dimostrata l'unica tecnica in grado di fornire, con continuità e con costi ridotti, dati geometrici utili alla conoscenza delle dinamiche del seracco in esame. L'utilizzo dell'elicottero per la realizzazione delle immagini permette di ottenere punti di vista ottimali su tutto il seracco, sacrificando, tuttavia, le precisioni ottenibili. Attualmente i rilievi da elicottero hanno precisioni che sono nell'ordine dei 40 cm. Tali precisioni sono da intendersi assolute (discordanza fra le coordinate misurate e quelle reali di punti appartenenti alla superficie del seracco, espresse in un sistema di riferimento globale) e non relative, ovvero inerenti la posizione reciproca di punti appartenenti al corpo nevoso. Ciò non toglie che, pur essendo tali precisioni sicuramente più elevate (dell'ordine di qualche centimetro), il realizzare blocchi fotogrammetrici da punti di vista differenti, con condizioni geometriche variabili di volta in volta in condizioni spesso svantaggiate (l'appoggio del blocco e reso difficoltoso dalla scarsa presenza nella scena di punti che possano ritenersi fissi e che non vengano coperti dalla neve nel corso delle stagioni, l'individuazione di punti di legame è resa ardua dalle caratteristiche superficiali della neve che non presenta elementi ben distinguibili) rende poco accurato il confronto fra modelli di superficie acquisiti in epoche differenti. Gli spostamenti del seracco vanno da 2 cm/giorno, in condizioni di normale dinamica, fino a 20 cm/giorno in condizioni di criticità. Con questi valori di spostamento, le attuali applicazioni fotogrammetriche non possono essere utilizzate per evidenziare eventuali anomalie negli spostamenti e quindi allertare gli organi competenti. Inoltre i costi e le difficoltà operative connessi ad una periodica e frequente acquisizione di immagini del seracco tramite elicottero rendono poco praticabile questa soluzione. Da queste considerazioni nasce l'idea di realizzare una postazione fotogrammetrica fissa, in prossimità della falesia di ghiaccio, in grado di raggiungere una precisione di rilievo che sia sufficiente per discriminare gli spostamenti in fase di criticità e di monitorare tali spostamenti con un'elevata frequenza temporale.

### Requisiti

Le fasi del processo fotogrammetrico sono le seguenti: realizzazione della coppia stereoscopica di immagini, trasferimento della coppia ai server di calcolo, restituzione modello tridimensionale.

Il punto di arrivo, allo stadio attuale, è la produzione di modelli tridimensionali del ghiacciaio orientati in un sistema di riferimento locale. Come sviluppo futuro si vuole arrivare ad automatizzare anche l'analisi multitemporale dei vari modelli per riconoscere eventuali criticità evolutive dell'apparato quali, ad esempio, accelerazioni anomale.

Come prima attività sono stati identificati i requisiti che avrebbe dovuto avere l'*hardware* per l'acquisizione delle immagini stereoscopiche. Il sito di installazione, posto ad una quota media di 4.100 m s.l.m., impone un'attenta valutazione di tutti gli aspetti progettuali e realizzativi.

I requisiti minimi che deve avere il sistema sono i seguenti:

- resistenza a condizioni ambientali estreme: temperature variabili tra i  $-30^{\circ}\text{C}$  e i  $+20^{\circ}\text{C}$ , venti forti con trasporto di aerosol formato da neve/ghiaccio, temporaneo accumulo nevoso sulle strutture, etc..;
- bassissimo consumo energetico: l'installazione di un pannello solare di grandi dimensioni crea problematiche nelle situazioni di vento forte (effetto vela);
- flessibilità nelle scelte dell'*hardware* di acquisizione: corpo macchina e ottiche;
- flessibilità nel controllo remoto del sistema;
- leggerezza e portabilità: installazione del sistema in zone raggiungibili solamente effettuando passaggi alpinistici.

Sono state valutate, *in primis*, eventuali soluzioni commerciali pronte all'uso con scarsi risultati. Sono state individuate alcune *webcam* particolarmente performanti ma con evidenti limiti di configurabilità fotografica e consumi energetici. Non ultimo, tutte le soluzioni erano limitate dalla presenza di codice informatico chiuso e non modificabile.

Si è quindi optato per l'ingegnerizzazione di un sistema che rispondesse a tutti i requisiti necessari utilizzando un corpo macchina reflex ad ottica intercambiabile e una scheda programmabile per il controllo della camera e per l'invio dei dati.

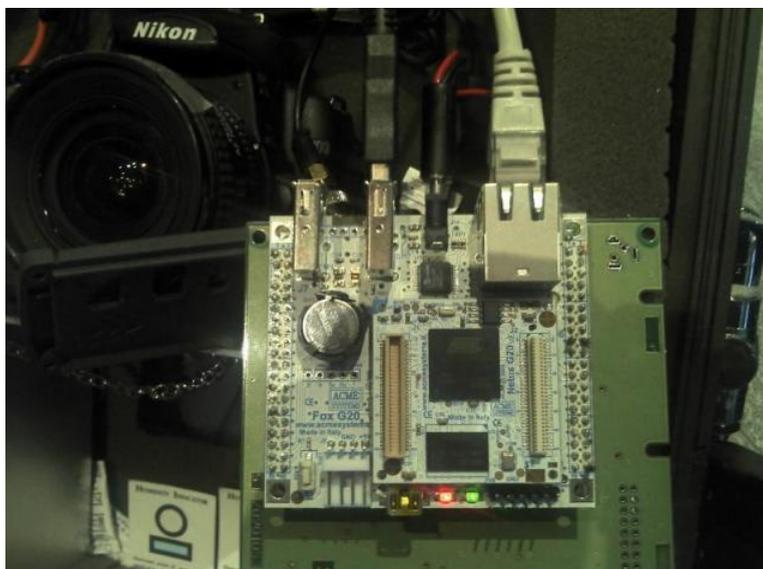


Figura 2 – In primo piano la scheda programmabile per il controllo del corpo macchina e del modem per l'invio dei dati sui server di calcolo.

### *Sistema di ancoraggio*

La scelta dei due siti di installazione (vedi paragrafi successivi) è stata fortemente vincolata dalla morfologia del terreno costituito da una cresta di roccia. Per questo motivo si è dovuto realizzare un supporto che fosse nel contempo leggero, sufficientemente robusto e dotato di un particolare snodo per consentire al corpo macchina di orientarsi in modo tale da inquadrare correttamente il ghiacciaio. Si è scelto quindi un supporto tubolare in acciaio zincato realizzato in modo tale da alloggiare sia il pannello, sia il box stagno per la protezione del corpo macchina.

### *Sistema di alimentazione*

Sono stati eseguiti dei test per verificare il consumo del sistema composto dal corpo macchina, dalla scheda programmabile e dal modem. Sono state installate tre batterie stagne da 17Ah e 12V (ogni batteria), in modo tale da garantire un'autonomia di funzionamento di 48 ore in assenza totale di irraggiamento solare. Le batterie sono ricaricate da un pannello fotovoltaico da 20W a 12V, compatto e leggero. Tale tipologia di pannello era stata utilizzata in precedenti installazioni ed è risultata un buon compromesso tra potenza resa, praticità di installazione e resistenza all'effetto vela di cui si è fatto cenno sopra.

### *Box per l'alloggiamento della strumentazione*

Sono stati scelti i box stagni prodotti dalla Peli. Tali contenitori sono certificati IP67 (stagni), sono molto leggeri e maneggevoli (dotati di ampia maniglia per il trasporto) ed estremamente resistenti. Inoltre sono disponibili in varie misure e forme. Il box è stato dotato di una valvola per poter realizzare il vuoto al suo interno. Le basse temperature alle quali viene sottoposto il sistema potrebbero causare la formazione di condensa all'interno del box con conseguente appannamento dell'ottica e inutilizzabilità del fotogramma. Oltre alla realizzazione del vuoto nel box, sono stati anche utilizzati dei composti in gel per prevenire ulteriormente la formazione di condensa.

### *Il micro-computer*

Tutto il sistema si basa su questo *micro-computer*: il controllo remoto dello scatto, la memorizzazione, una prima elaborazione e la trasmissione delle immagini ai server di calcolo. La necessità di avere una piattaforma di sviluppo estremamente flessibile e operativa ha imposto la scelta di un sistema operativo con *kernel* Linux. In particolare la scheda programmabile ospita una Debian 6.0 "Squeeze". Questo sistema operativo è equivalente a quelli installati su server più performanti e quindi può contare su una grandissima quantità di software *open-source* disponibile. In particolare sono stati utilizzati i seguenti programmi per gestire le varie operazioni:

- *libphoto*: librerie per l'interfaccia della scheda con il corpo macchina; queste librerie permettono di controllare qualsiasi aspetto delle operazioni di presa fotografica, dalla scelta della coppia tempo/diaframma, al bilanciamento del bianco, alla scelta del modo in cui l'esposimetro legge l'intensità della luce etc.;
- *ImageMagick*: librerie per l'*editing* avanzato delle immagini; per poter ridurre al minimo i dati da trasferire ai server di calcolo, si è scelto di utilizzare solamente la banda del blu e di comprimere le immagini nel formato *jpg* in modo da avere *files* dell'ordine di 1MB;
- *lftp*: *client* avanzato per la gestione dei trasferimenti dei *files* sui server con il protocollo *ftp*;
- *cron*: programma per lo *scheduling* delle operazioni;

La scheda programmabile è connessa in seriale con un modem GSM per la trasmissione dei dati e per il controllo della stessa da postazioni remote. In particolare, da remoto tramite il protocollo *ssh*, si possono controllare tutti i parametri di presa, le frequenze di acquisizione e qualsiasi altro aspetto legato al sistema in modo tale da avere massima flessibilità del sistema. La scheda è collegata alla rete internet in continuo e sono stati sviluppati dei codici che si occupano di riconnettere in automatico la scheda nel caso in cui si perdesse il segnale GSM.

La scheda aggiorna, tramite connessione internet, ogni 15 minuti l'ora e la data del sistema. In questo modo le due camere scattano contemporaneamente le immagini della stereocoppia.

### *Il corpo macchina e le ottiche*

La scelta del corpo macchina è stata fortemente condizionata da diverse esigenze:

- la risoluzione geometrica del sensore: con le geometrie di presa individuate, e le precisioni volute (vedi paragrafi successivi), la camera doveva avere almeno una risoluzione di 12Mp;
- la possibilità di montare differenti tipi di ottiche fisse: l'ottica fissa si impone in ambito fotogrammetrico per la qualità dell'immagine prodotta; la possibilità di scegliere tra varie ottiche fisse permette di avere una certa flessibilità sulla geometria di presa, o viceversa permette di avere grande flessibilità in caso di geometria imposta (come nel nostro caso);
- la possibilità di connettere la camera ad un *computer* per il suo controllo remoto;
- la possibilità di avere un visore della camera orientabile e dotato di opzione *live-view* per la realizzazione dell'inquadratura corretta con corpo macchina solidale al box;
- la possibilità di alimentare la camera da sorgente elettrica esterna;
- la compatibilità della camera con le librerie *open-source* per il suo controllo remoto.

Il corpo macchina D5000 della Nikon soddisfa tutte le esigenze di cui sopra ad un prezzo accettabile. Su di esso è stata montata un'ottica Nikon AF 20 MM 2,8 D. Si è scelto un grandangolo così spinto poiché la D5000 presenta un sensore nel formato APS-C con un fattore di *cropping* pari a 1,6x. Tale fattore riduce l'angolo di campo del 20 mm installato, rendendolo equivalente a quello di un 32 mm. Con questa lunghezza focale si riesce ad inquadrare completamente la zona di interesse dai due punti scelti per le installazioni.



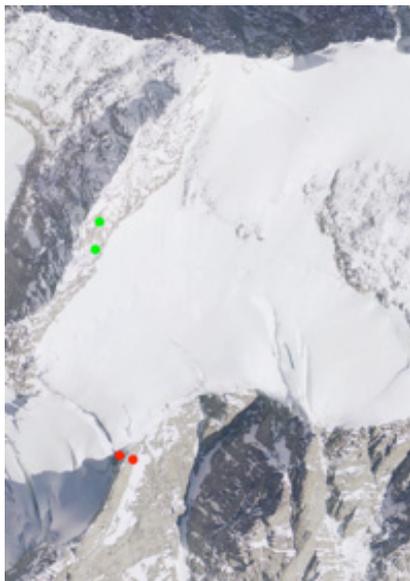
*Figura 3 – Immagine raffigurante il primo sistema di acquisizione realizzato.*

### **La scelta della geometria di presa**

Le riprese fotogrammetriche sono finalizzate ad ottenere un modello digitale complessivo del seracco e del terreno avente spaziatura media tra i punti di circa 20 cm, con precisione stimata in circa 5÷10 cm.

La prima considerazione pratica riguarda l'individuazione dei siti di potenziale installazione: da un punto di vista logistico ne sono stati individuati due da personale FMS (vedi figura 4). Il sito individuato con le marche rosse sarebbe un punto di presa ideale per la prospettiva frontale rispetto alla fronte del seracco. Tuttavia la distanza tra le camere e l'oggetto da rilevare sarebbe troppo

elevata per poter raggiungere le precisioni di progetto. Inoltre la base di presa fra i due fotogrammi risulta troppo corta e difficilmente si è in grado di assicurare una sufficiente precisione; infine, in questa configurazione gli spostamenti del seracco avvengono prevalentemente lungo la direzione individuata dall'asse ottico delle camere ovvero proprio lungo la direzione in cui è lecito aspettarsi gli errori di misura maggiori. Di contro da questo punto di scatto sarebbe possibile ottenere una scala fotogramma all'incirca uniforme su tutto il fronte del seracco, garantendo un'uniformità di precisioni di tutti i punti monitorati; in più la visuale frontale permetterebbe una ricostruzione sicuramente più completa e uniforme anche dal punto di vista delle risoluzioni sull'oggetto.



*Figura 4 – Individuazione delle possibili posizioni di presa del sistema di monitoraggio del seracco.*

Nonostante i vantaggi dal punto di vista della ricostruzione appena illustrati la posizione appena analizzata non garantisce il soddisfacimento delle specifiche di precisione e si è quindi optato per un sito più prossimo alla falesia, ammettendo un punto di vista più scorciato e quindi una scala fotogramma molto meno uniforme: le condizioni di installazione non lasciano molto margine di scelta.

Dal sito scelto si è calcolata la massima distanza dall'oggetto, 220 m, sulla quale verranno effettuati tutti i calcoli di progetto (vedi figura 5).

L'assetto delle camere sarà molto probabilmente lievemente convergente per garantire il massimo ricoprimento fra i fotogrammi. Visti tuttavia gli angoli di convergenza contenuti per la valutazione della precisione ci si può rifare alla propagazione della varianza nel caso normale di stereorestituzione. Considerata una distanza dall'oggetto pari a 220 m, una distanza principale (assimilabile in prima approssimazione alla lunghezza focale delle ottiche utilizzate), pari a 20 mm, una base di presa pari a 60 m, una precisione di misura delle coordinate immagine prudenzialmente pari a 0.35 pixel, l'errore lungo la direzione dell'asse ottico della camera risulta pari a circa 8 cm, mentre nelle due direzioni ortogonali a quest'ultima (approssimativamente parallele alla direzione della verticale e alla direzione di scivolamento del seracco) l'errore, più contenuto, risulta pari a poco più di 2 cm.

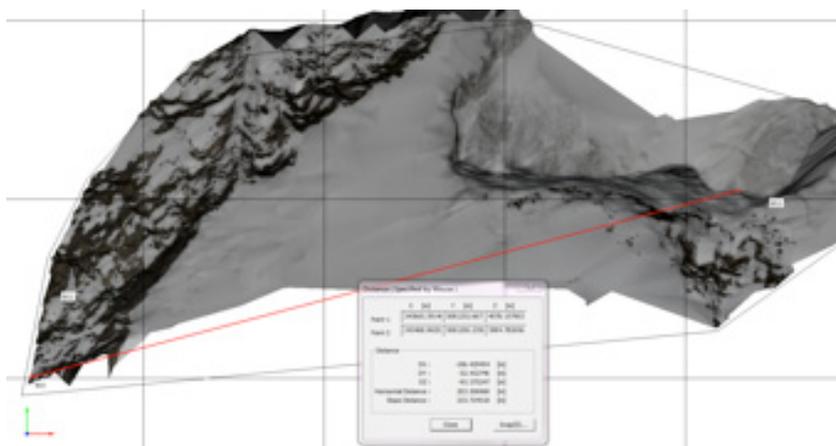


Figura 5 – Misura delle distanze di presa dalle posizioni di acquisizione ritenute più indicate per l'installazione del sistema di monitoraggio.

Bisogna tuttavia sottolineare che le formule utilizzate partono dall'ipotesi di disporre di parametri di orientamento interno (la distanza principale in particolare) ed esterno noti ed esatti. L'influenza che una variazione di tali parametri non considerata nella fase di restituzione può avere sul risultato metrico finale un impatto decisivo: tali variazioni, che potrebbero essere dovute ad una molteplicità di cause (variazioni di temperatura, spostamenti della scatola di acquisizione per effetto del vento o del carico-neve, etc.) possono pregiudicare completamente il buon esito del processo.

In questo specifico caso non solo bisogna prevedere una naturale incertezza sui parametri di orientamento esterno ed interno che in maniera più o meno trascurabile possono influire sulla corretta determinazione delle coordinate cartografiche dei punti, ma diventa primario tenere in conto le variazioni che tali parametri possono subire fra un'acquisizione e l'altra: in tale frangente, infatti, si assisterebbe ad un movimento apparente del seracco (con buona probabilità prevalente in direzione dell'asse ottico delle camere) che potrebbero essere assolutamente non trascurabile.

#### *Stima dei parametri di orientamento interno*

Il primo elemento da definire con la massima accuratezza possibile durante la fase di realizzazione delle stazioni di acquisizione delle immagini riguarda i parametri di calibrazione e di orientamento interno delle camere fotogrammetriche utilizzate: trattandosi di camere semi-professionali digitali di fascia consumer, prevedere una calibrazione in laboratorio risulta non solo sconsigliabile ma addirittura impossibile. Al contrario una calibrazione analitica della camera sembra la soluzione più corretta e al tempo stesso compatibile con le esigenze di budget del progetto. In tal senso una comune procedura tramite cartellone di calibrazione può fornire risultati soddisfacenti, a patto che il numero delle prese effettuate sia elevato e la loro distribuzione spaziale permetta con buona garanzia di eliminare possibili accoppiamenti fra i parametri durante la fase di stima a minimi quadrati: qualora si generassero forti componenti di correlazione fra i parametri di orientamento interno (o fra quelli interni e quelli esterni) si potrebbe giungere a una stima finale dei parametri in cui i residui delle equazioni di collinearità risultino ottimali ma, almeno per i parametri accoppiati, il valore degli stessi risultati non corretto. Fintanto che, per la valutazione dei parametri di orientamento esterno, si utilizza di nuovo una stima a minimi quadrati il problema potrebbe essere trascurato poiché la stessa correlazione fra parametri porterebbe comunque ad una soluzione proiettivamente equivalente (almeno in prima approssimazione) in cui, sostanzialmente, le coordinate terreno dei punti risulterebbero corrette. Prevedendo difficoltà in questo caso a materializzare un set di punti d'appoggio soddisfacente per l'orientamento del blocco diventa

importante considerare attentamente questo aspetto: i parametri posizionali delle camere potrebbero essere determinati tramite opportune procedure topografiche o tramite la combinazione di informazioni topografiche e fotogrammetriche. In questo caso qualsiasi errore in termini di parametri di orientamento interno si rifletterebbero direttamente sulle coordinate terreno dei punti con risultati poco prevedibili e, soprattutto, difficilmente quantificabili. Come si diceva, dunque, la soluzione migliore, in considerazione anche delle risorse economiche a disposizione, risulta una calibrazione analitica tramite cartellone di calibrazione: è fondamentale che in tutte le posizioni di scatto, ben distribuite attorno al cartellone e con angoli di convergenza elevati, vengano acquisite almeno tre immagini ognuna ottenuta ruotando rispetto alla precedente la camera di 90° attorno all'asse ottico della stessa: come noto la procedura garantisce un buon disaccoppiamento dei parametri, in particolare di quelli legati alla posizione del punto principale rispetto agli altri. Infine tutte le procedure di calibrazione devono essere effettuate con la camera già fissata saldamente al suo box: il vetro protettivo antistante la camera rappresenta infatti un ulteriore elemento ottico che può provocare effetti di distorsione del percorso dei raggi di proiezione.

#### *Variazione dei parametri di orientamento interno e loro controllo*

Ipotizzando di utilizzare, nel corso delle periodiche restituzioni dei modelli del seracco, parametri di orientamento esterno costanti e determinati direttamente, qualsiasi cambiamento dei parametri di orientamento interno possono provocare errori di restituzione che, in certi casi, non possono essere considerati trascurabili. In particolare forti escursioni termiche possono comportare variazioni della distanza principale del sistema ottico: tali variazioni si riflettono direttamente sul calcolo delle coordinate terreno dei punti lungo la direzione dell'asse ottico. Prevedendo una distanza di circa 200 m dall'oggetto anche una variazione dello 0.05% (corrispondente quindi a circa 50 mm) introdurrebbe uno spostamento erroneo dei punti in questa direzione pari a 10 cm, ovviamente inaccettabile per le finalità del sistema. Anche in questo caso tuttavia bisogna considerare che lo scopo principale del sistema è quello di confrontare modelli digitali di superficie del seracco acquisiti ad intervalli regolari e piuttosto ravvicinati nel tempo, per cui il problema potrebbe essere molto più circoscritto di quanto non possa sembrare: il box è stato dotato di un rilevatore di temperatura con il quale è possibile cercare di effettuare gli scatti in modo che due fotogrammi consecutivi non vengano acquisiti in condizione di temperatura troppo differenti; in alternativa, inviando il dato di temperatura alla stazione di controllo si potrebbe decidere di non confrontare due epoche acquisite in condizioni climatiche troppo diverse. In tal senso, nei successivi sviluppi delle attività, si intende realizzare un set di prova che permetta di valutare fattivamente le variazioni dei parametri di orientamento interno in corrispondenza di modificazioni ambientali, onde determinare i limiti di operatività del sistema proprio in corrispondenza di cambiamenti meteorologici improvvisi.

#### *Stima dei parametri di orientamento esterno*

Per la determinazione delle coordinate terreno dei punti del seracco l'altro aspetto da tenere in particolare considerazione, e che nel caso in esame può presentare problemi tecnici non trascurabili, è la stima o il calcolo dei parametri di orientamento esterno di ciascuna delle stazioni di acquisizione: per come si presenta la configurazione di blocco e considerata l'area inquadrata dalle fotocamere risulta tecnicamente complesso prevedere di materializzare sull'oggetto una rete di punti d'appoggio ben distribuiti e soprattutto ben visibili per ottenere i parametri da una stima a stelle proiettive.

Si ricorda che lo scopo del sistema di monitoraggio non è comunque quello di definire la posizione del corpo nevoso quanto piuttosto metterne in luce la dinamica evolutiva nel corso del tempo: in altre parole la definizione del sistema di riferimento in una certa misura può godere di una certa arbitrarietà a patto di permettere comunque di determinare correttamente gli spostamenti e i mutamenti di forma dell'oggetto. In particolare risulta di interesse definire in maniera corretta prioritariamente la messa in scala del modello e in seconda istanza orientare correttamente il sistema di riferimento in modo che il suo asse Z corrisponda con la verticale locale.

Per quanto concerne i parametri traslazionali e l'orientamento rispetto al nord del modello essi possono essere ritenuti di secondaria importanza per gli scopi del sistema e determinati anche indirettamente tramite, ad esempio, allineamento con particolari naturali visibili sui fotogrammi e misurabili topograficamente.

Come anticipato, per determinare i due parametri rotazionali che definiscono la verticale è richiesta una precisione ottenibile tramite anche pochi punti d'appoggio, a patto che essi siano ben distribuiti spazialmente attorno al corpo nevoso che si intende monitorare.

Per quanto riguarda la base di presa essa può essere semplicemente ottenuta prevedendo un attacco da 5/8", per installare sulla sommità del box di protezione delle camere una basetta topografica cercando, se possibile, di centrare l'attacco approssimativamente sulla verticale del centro di proiezione della camera stessa: la basetta permette di installare, durante la messa in opera del box, un prisma topografico onde determinarne le coordinate con la maggior accuratezza possibile. Volendo, sulla basetta può essere applicata, in alternativa, un'antenna GPS per determinarne direttamente le coordinate geografiche/cartografiche; tuttavia, soprattutto a queste quote, la determinazione delle coordinate GPS è sicuramente meno accurata, anche nella definizione della base fra i due box, rispetto ad altre tecniche (teodolite). Pur ammettendo una certa incertezza nel centrare l'attacco in corrispondenza del centro di proiezione e pur non prevedendo di correggere le osservazioni tenendo in conto dell'eccentricità fra centro del prisma e centro principale (come invece è possibile fare, tramite una procedura di calibrazione del sistema di protezione), l'errore commessibile nel determinare la base di presa (cautelativamente 10÷20 cm) è del tutto trascurabile per quanto concerne la stima degli spostamenti: anche ammettendo una base di presa molto ridotta (10 m) l'errore sulla sua lunghezza ha un'influenza di appena l'1÷2% sulla misura degli spostamenti. Prevedendo spostamenti fra un'epoca e l'altra (ad un giorno di distanza l'una dall'altra) al massimo di 20÷30 cm l'errore introdotto dalla non corretta messa in scala del modello risulta dunque al massimo di 4÷6 mm, abbondantemente inferiori agli errori di misura previsti.

#### *Stima dei parametri di orientamento esterno*

In tutta analogia con i parametri di orientamento interno anche variazioni non modellate nella posizione reciproca o nell'assetto delle camere può introdurre spostamenti apparenti nel modello. Gli effetti dell'utilizzo di parametri di orientamento relativo non corretti nella produzione di un modello sono un tema decisamente di più facile trattazione e sicuramente molto più studiato in fotogrammetria rispetto al precedente (Kraus, 2007).

L'aspetto più preoccupante, ovvero una variazione significativa della base di presa, è in questo caso da escludere in quanto il box di protezione è ben vincolato al suolo. Tuttavia è possibile (e a nostro avviso anche probabile) che a seguito di varie sollecitazioni, come il carico neve sul box o la spinta dovuta al vento, possano verificarsi variazioni non trascurabili in termini di angoli di assetto.

Per mettere in evidenza possibili movimenti fra un'epoca e la successiva è stato messo a punto e implementato un algoritmo di orientamento relativo automatico. L'idea, sviluppata nelle attività di quest'anno, è che il sistema software di restituzione confronti automaticamente ciascuna delle due immagini ottenute ad una certa epoca con l'immagine acquisita nella posizione coniugata all'epoca precedente onde mettere in evidenza possibili movimenti: qualora tali movimenti superino una certa soglia, ritenuta non trascurabile per l'effetto che potrebbe avere sulla restituzione, i parametri di orientamento esterno vengono opportunamente modificati in ragione della soluzione di orientamento relativo stimata, al fine di ridurre (o addirittura eliminare) gli errori di restituzione stessi.

Il metodo di stima proposto da (Nister, 2004) per la matrice essenziale permette di determinare con grande affidabilità la geometria relativa fra due fotogrammi senza bisogno di disporre di parametri di orientamento approssimati. Inoltre, vista la natura lineare del calcolo, è possibile rendere la stima robusta, ad esempio utilizzando l'algoritmo RANSAC. In questo modo è facile rendere automatica la procedura che a partire da due fotogrammi ne determina i parametri di orientamento relativo.

### **Il sistema di restituzione**

Il sistema software di restituzione delle immagini è stato sviluppato secondo una struttura modulare utilizzando in parte codici di calcolo già sviluppati e in parte tramite nuove routine (in particolare per l'orientamento relativo automatico). Le fasi operative di elaborazione possono essere così riassunte:

1. Innanzitutto, tramite operatori di interesse si estraggono dai due fotogrammi un numero elevato di punti immagine ritenuti ben riconoscibili e possibilmente tracciabili nelle diverse epoche di acquisizione;
2. Tali punti vengono poi messi in correlazione gli uni con gli altri sfruttando vincoli di natura geometrica e radiometrica: al momento, per la sperimentazione iniziale, si sono sfruttate librerie di codice che si basano sull'operatore e sul descrittore SURF (Bay et al., 2008).
3. I punti vengono utilizzati in una procedura RANSAC per determinare la matrice essenziale e gli outlier (gli accoppiamenti sbagliati): al termine della procedura è possibile ricavare i parametri di orientamento relativo;
4. Per quanto visto precedentemente la base di presa difficilmente subisce variazioni apprezzabili, almeno dal punto di vista dell'influenza sul calcolo degli spostamenti: il sistema modello viene dunque riscaldato in modo da riportare la base di presa alla sua vera grandezza; allo stesso modo si suppone fissa la stazione fotogrammetrica all'epoca precedente e il sistema di riferimento viene dunque ruotato in modo da riportarla opportunamente alla sua posizione;
5. Per ottenere maggiori informazioni statistiche sul processo di stima (in particolare per la valutazione delle precisioni di stima dei parametri di orientamento) si utilizzano i risultati ottenuti in un sistema di stima a minimi quadrati.
6. A questo punto si valuta lo spostamento (ovvero le variazioni) dei parametri di orientamento esterni intervenuto fra un'epoca e l'altra. Le variazioni vengono testate relativamente alla loro precisione per determinare se gli spostamenti siano significativi da un punto di vista statistico;
7. Qualora ciò avvenga viene generato un avviso (che potrà poi essere inviato via SMTP a un incaricato della sorveglianza del sistema) in cui viene sottolineata l'esistenza di un evento (lo spostamento di una o di entrambe le stazioni di acquisizione) potenzialmente pericolosa per la correttezza dei risultati;
8. Al tempo stesso i nuovi dati di orientamento vengono inviati al sistema di generazione del DSM per cercare di rimuovere possibili deformazioni indesiderate nella generazione del modello.

Il sistema di produzione del DSM è basato su codice proprietariamente sviluppato basato sulla correlazione di immagine a minimi quadrati (LSM (Gruen, 1984)) ed è in grado di raggiungere precisioni subpixel anche in presenza di elementi poco contrastati come nel caso della superficie nevosa del seracco.

### **Conclusioni**

Il rilievo fotogrammetrico per il monitoraggio del Seracco delle Grandes Jorasses rappresenta un'interessante sfida: le dimensioni dell'oggetto, la richiesta di avere una descrizione minuziosa della morfologia della parete, i tempi di intervento ed elaborazione hanno richiesto l'applicazione di metodologie di rilievo molto efficienti e accurate. L'impostazione della tecnica di rilievo ha privilegiato l'impiego di strumentazione standard a basso costo per le riprese fotogrammetriche ed un appoggio del blocco basato su misure topografiche ausiliarie.

Tuttavia esistono ancora alcune difficoltà da superare e perplessità che richiedono di essere risolte: le posizioni in cui installare le camere non sono del tutto soddisfacenti non permettendo una ottimale visione del fronte del seracco; se da un lato la geometria di presa, in questo modo, favorisce la misura degli spostamenti in quanto la massima precisione si raggiunge proprio lungo la direzione di scivolamento del seracco, la restituzione dei punti risulta meno soddisfacente per il

fatto che, a causa della vista scorciata, non si ha una buona visibilità di tutte le zone del fronte. Gli evidenti vincoli operativi richiedono dunque di operare una attenta valutazione di tutte le variabili presenti al fine di individuare una soluzione di compromesso ottimale.

Allo stesso tempo alcune attività (come lo sviluppo di modalità di verifica delle variazioni nei parametri di orientamento del sistema) al momento hanno superato solamente la fase di progettazione e richiederanno un lungo collaudo una volta installato il sistema di acquisizione.

L'auspicio è che, una volta superata la fase di messa a punto, il sistema, anche in virtù del suo basso costo di realizzazione e installazione possa essere fattivamente usato per il monitoraggio di altri corpi nevosi o rocciosi così come in ambiti differenti.

## **Bibliografia**

**Pralong A., Funk M. (2006)**, "On the instability of avalanching glaciers", *Journal of Glaciology*, Volume 52, Number 176, 31-48

**Margreth, S. (1997)** "Grandes Jorasses — Glacier Whymper, étude sur le probleme des avalanches", SLF/Regione Autonoma Valle d'Aosta

**Margreth S., Funk M. (1999)**, "Hazard mapping for ice and combined snow/ice avalanches - two case studies from the Swiss and Italian Alps", *Cold Regions Science and Technology*, 30 (1-3), pp. 159-173

**Margreth S. (2009)**, "Hazard from ice avalanches from the Whymper glacier, Gr. Jorasses – Val Ferret, Courmayeur, Italy", SLF/Regione Autonoma Valle d'Aosta

**Margreth S., Funk M., Vagliasindi M., Broccolato M. (2010)**, "Safety concept for hazards from ice avalanches from the whymper hanging glacier in the Mont Blanc Massif", ISSW 2010 Proceeding volume

**Funk M. (1997)**, "Grandes Jorasses-Glacier Whymper, rapport sur le problème des chutes de séracs", VAW Zurigo/Regione Autonoma Valle d'Aosta

**libgPhoto2 (2011)**, "libgphoto2 is the core library designed to allow access to digital camera by external programs", <http://www.gphoto.org>

**Debian 6.0 "Squeeze" (2011)**, "Debian is a free operating system (OS) for computers", <http://www.debian.org/>

**Kraus K. (2007)**, "Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans", Dummler, Bonn, 1997.

**Nistér D. (2004)**. "An efficient solution to the five-point relative pose problem". *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26 (6). pp. 756–777.

**Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. (2008)** "SURF: Speeded Up Robust Features", *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, Vol. 110, No. 3, pp. 346-359.

**Gruen A. (1985)** "Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique", *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartograph.* Vol. 14. pp. 175-187.

**Roncella R., Forlani G. (2009)** "Modelli Digitali di Pareti in Alta Quota: Metodologie e Casi di Studio". *Convegno Nazionale SIFET - Dalle misure al modello digitale.* Mantova, vol. 1, p. 77-86, ISBN/ISSN: 88-901939-7-2