

# CONFRONTO METRICO DI TECNICHE DI ORIENTAMENTO AUTOMATICO

## METRIC COMPARISON OF AUTOMATIC ORIENTATION TECHNIQUES

E. Dall'Asta <sup>a</sup>, L. Perini <sup>a</sup>, K. Thoeni <sup>b</sup>, R. Roncella <sup>a</sup>, A. Giacomini <sup>b</sup>

<sup>a</sup> D.I.C.A.T.e A., Università degli Studi di Parma ([elisa.dallasta@studenti.unipr.it](mailto:elisa.dallasta@studenti.unipr.it), [riccardo.roncella@unipr.it](mailto:riccardo.roncella@unipr.it))

<sup>b</sup> Centre for Geotechnical and Materials Modelling di Newcastle NSW, Australia ([anna.giacomini.klaus.thoeni@newcastle.edu.au](mailto:anna.giacomini.klaus.thoeni@newcastle.edu.au))

**PAROLE CHIAVE:** Orientamento, Automazione, Accuratezza, Confronti, Calibrazione, DEM/DTM

**KEY WORDS:** Orientation, Automation, Accuracy, Comparison, Calibration, DEM/DTM

### RIASSUNTO

Nell'ultimo decennio si è assistito in ambito fotogrammetrico ad una sempre maggior diffusione di tecniche automatiche che permettono, anche ai non addetti ai lavori, una semplice e rapida applicazione di tali tecniche nei più disparati ambiti. Oggigiorno esistono diversi prodotti commerciali o freeware che implementano tecniche di orientamento automatico e spesso l'utente inesperto ritiene le diverse soluzioni equivalenti dal punto di vista metrologico.

Oggetto di questo lavoro è uno studio comparativo tra due sistemi di orientamento di blocchi fotogrammetrici, solitamente impiegati a supporto di una successiva modellazione 3D, basati sui principi della Structure from Motion. Scopo è quello di identificare la variabilità dei risultati ottenuti in termini di affidabilità e di precisione di ricostruzione del modello tridimensionale finale. Il primo sistema (EyeDEA) è basato su un approccio fotogrammetrico rigoroso mentre il secondo sistema (Bundler), sviluppato prevalentemente nell'ambito della visione artificiale, utilizza algoritmi e approcci analitici diversi da quelli tradizionalmente usati in fotogrammetria.

### ABSTRACT

Automatic orientation of image sequences in close range photogrammetry is becoming more and more important and a large number of strategies and implementations of Structure from Motion (SFM) have been developed. There are several commercial and freeware products which implement automatic orientation procedures but often inexperienced users regard as equivalent these different solutions.

Object of this work is a comparative study between two 3D modelling systems based on the principles of Structure from Motion, which allows to identify interior and exterior orientation parameters of the camera and the reconstruction of a point cloud using a collection of images. The purpose is to identify the variability of the results obtained in terms of reliability and accuracy reconstruction of the final three-dimensional model. The first software package (EyeDEA) is based on a rigorous photogrammetric approach while the second system (Bundler), developed mainly in the context of computer vision, uses algorithms and analytical approaches different usually not as rigorous as photogrammetric techniques.

## 1. INTRODUZIONE

La storia della fotogrammetria è molto legata, nei suoi principi teorici, alla storia della geometria descrittiva ed in particolare alla formulazione della teoria della prospettiva mentre, nella sua applicazione, è legata alla storia dell'ottica, della fotografia ed ai relativi progressi tecnologici. La fotogrammetria rappresenta uno strumento di acquisizione di dati metrici e tematici tra i più affidabili. Appare quindi evidente come lo scopo delle tecniche di ricostruzione basate su tale approccio sia tradizionalmente sempre stato focalizzato sull'ottenere il più elevato grado di accuratezza, completezza e dettaglio; di contro le numerose difficoltà, non solo pratiche ma spesso anche concettuali, che caratterizzano un rilievo fotogrammetrico, richiedono in genere la presenza di un operatore esperto (Barazzetti et al., 2010).

Dall'inizio degli anni '90, con il diffondersi delle prime camere digitali, il settore della Computer Vision (CV) si è occupato dell'automazione dell'orientamento di coppie, terne o sequenze di immagini (Fitzgibbon e Zisserman, 1998; Pollefeys et al., 2004) e della generazione di modelli digitali di superficie (DSM – Digital Surface Model), sviluppando software scientifici e commerciali che consentano di eseguire automaticamente tali processi.

Soprattutto negli ultimi anni, al fianco delle tradizionali tecniche tipiche della fotogrammetria basate su modelli geometrici rigorosi funzione di parametri fisici, si sono inseriti o affiancati contributi provenienti da questo settore che hanno permesso di raggiungere un elevato grado di automazione all'interno dei processi, spesso però a fronte dell'utilizzo di modelli numerici e geometrici semplificati o con un maggior numero di gradi di libertà: basti pensare, a questo riguardo, al largo impiego nella CV di sistemi di equazioni sovra-parametrizzati, spesso utili per linearizzare le equazioni risolventi o semplificare la determinazione di parametri approssimati ma che possono rappresentare una pericolosa sorgente di correlazioni indesiderabili fra le variabili.

Se da un lato lo sviluppo delle tecniche di CV sta consentendo sempre più di migliorare l'efficienza e la velocità dell'intero processo di restituzione fotogrammetrica, consentendo di creare modelli 3D con oneri minori a livello computazionale, dall'altro è possibile verificare che, a volte, le soluzioni stimate con queste tecniche non raggiungono lo stesso grado di accuratezza di procedure fotogrammetriche più rigorose. Pur banalizzando l'attuale panorama tecnico-scientifico - forse eccessivamente, dato il confine sempre più sfumato fra le due aree disciplinari - si può tuttavia ancora

asserire che in fotogrammetria l'attenzione viene posta soprattutto sull'accuratezza geometrica del prodotto finale, mentre in CV l'obiettivo primario è l'efficienza computazionale. Al tempo stesso, forse di nuovo per un retaggio culturale, l'approccio scientifico dei fotogrametri è spesso più rivolto ad uno specifico settore applicativo, mentre nell'ambito delle scienze dell'informazione è più comune, nello sviluppo algoritmico, una ricerca di maggiore generalità. Seppur a fronte di un intervento umano non trascurabile, un progetto fotogrammetrico ottiene risultati rigorosi e controllabili dal punto di vista stocastico (Barazzetti et. al., 2010b) per assicurare la propria qualità e correttezza. Illuminante (e divertente), a tal riguardo, risulta il contributo in Foerstner (2002) che dopo più di dieci anni è ancora attuale nel mettere in luce le dicotomie fra i due approcci, così come quelli che dovrebbero essere punti di contatto fra le due discipline.

A questo punto il problema che si pone è proprio l'individuazione delle interferenze, piuttosto che delle differenze, tra questi due approcci; fino a che punto è possibile (o auspicabile) l'integrazione fra le tecniche derivate dalla CV e quelle più "datate", ma anche più assodate, fotogrammetriche? Con quale affidabilità possiamo eseguire analisi metriche su scene ricostruite con algoritmi automatici che, oltre alle immagini, non richiedono alcuna informazione sui parametri di calibrazione e sulla geometria di presa? Soprattutto: da un punto di vista culturale è opportuno promuovere incondizionatamente l'automazione delle procedure in favore di un ampliamento notevole della base di utilizzatori potenziali o, di contro, trincerarsi dietro la rigidità delle operazioni di misura ma lasciando all'appannaggio di una ristretta élite di utilizzatori esperti la possibilità di estrarre informazioni metriche dalle immagini? Rispondere a questi quesiti appare molto difficile in quanto differenti considerazioni possono essere fatte, prima di tutto in merito allo scopo della modellazione. Infatti è necessario tener presente che le tecniche di CV appaiono sicuramente idonee per lo sviluppo di software semplificati, il cui utilizzo appare alla portata di tutti (ad esempio PhotoTourism, AgiSoft PhotoScan, Bundler) e il cui scopo è solamente una visualizzazione dei contenuti della scena. Ma, laddove si mostri importante la precisione di ricostruzione dell'oggetto, al fine di poter derivare informazioni di tipo metrico dai dati, l'eccessiva semplicità con cui si giunge al risultato finale, senza il dovuto approfondimento in merito alla correttezza delle operazioni e alla valutazione della qualità in funzione di una serie di indicatori (ad esempio confronti con dati di controllo, statistiche che rendano conto della qualità e robustezza geometrica del blocco, residui delle equazioni di collinearità, etc.), come si vedrà può portare a produrre e diffondere dati anche inaccurati.

L'enorme diffusione che sta avendo la fotogrammetria negli ultimi anni non poteva che mettere in luce le divergenze riguardo l'approccio più idoneo ed efficiente da seguire. Al tempo stesso la strategia di sviluppo vincente in questo momento appare essere il trovare i punti di contatto e integrare i punti di forza di entrambe le discipline per risolvere i reciproci punti di debolezza.

Il presente lavoro ha lo scopo di confrontare due differenti tecniche di orientamento automatico, una sviluppata in ambiente CV (Bundler), l'altra in ambito fotogrammetrico (EyeDEA). Nella pratica quello che differenzia i due codici è che Bundler consente di ricostruire la struttura di blocco generando legami tra tutte le coppie possibili di immagini; inoltre permette di stimare i parametri di orientamento interno di ciascuna camera senza richiedere informazioni sui parametri di calibrazione. Diversamente, l'altro approccio

(EyeDEA) elabora solo sequenze ordinate di fotogrammi (struttura del blocco in strisciate sovrapposte), selezionando legami tra immagini consecutive (maggiormente affidabili), e richiede l'inserimento dei parametri di calibrazione.

Tali differenze non costituiscono necessariamente un limite laddove si lavori su sequenze e blocchi ordinati di immagini; è altresì vero che conoscere i parametri di calibrazione si traduce in molti casi in risultati più affidabili e controllati, in particolare quando la geometria della sequenza non ne consente una stima accurata con metodi di auto-calibrazione.

Nella prima parte dell'articolo verranno brevemente descritte da un punto di vista teorico le procedure utilizzate dalle due tecniche di orientamento automatico; verranno poi descritti e confrontati i risultati ottenuti nei diversi casi di studio al fine di evidenziare le principali differenze computazionali e prestazionali tra i due sistemi. Volendo in particolare valutare l'influenza della fase di individuazione dei punti di legame (feature matching), per eliminare l'influenza delle elaborazioni successive (bundle adjustment e produzione del DSM) sul risultato finale, per queste fasi si sono utilizzati i medesimi software per entrambi i flussi di lavoro.

Dai confronti risulta evidente che le tecniche di CV, seppur estremamente efficienti, possono portare, anche in casi insospettabili, a risultati inattesi: a volte il processo non va a buon fine e l'utente avendo evidenza immediata del mancato successo può cercare di individuare il problema che lo ha causato (parametri di calibrazione assenti o errati, struttura geometrica poco rigida, scarsa qualità delle immagini, non adeguato ricoprimento dei fotogrammi, etc.); in molti altri casi, tuttavia, le diverse tecniche riescono a produrre una soluzione di orientamento dalla quale è possibile ricavare modelli anche accattivanti visivamente (le tecniche di matching sviluppate in CV hanno spesso prediletto la completezza e regolarità geometrica) ma scadenti dal punto di vista della rispondenza metrica: in tali circostanze l'adagio Keatsiano su bellezza e verità può essere fuorviante per il romantico ma ingenuo utilizzatore inesperto.

## 2. PROCEDURE FOTOGRAMMETRICHE AUTOMATICHE PER L'ORIENTAMENTO DI IMMAGINI

In CV le strategie per l'orientamento automatico vanno generalmente sotto il nome di "Structure from Motion" (SfM) o "Structure and Motion"; esse consentono di stimare simultaneamente, da un insieme di corrispondenze (features) tra le immagini, i parametri di orientamento interno ed esterno e le coordinate dei punti oggetto (Barazzetti et. al., 2011b).

I dati in ingresso sono dunque le immagini e i parametri di calibrazione della fotocamera utilizzata (qualora siano noti o preventivamente calcolati). Schematicamente la SfM si articola in una fase iniziale in cui, con opportuni operatori matematici, si estraggono ed abbinano i punti omologhi fra le immagini. Segue il bundle adjustment dell'intero blocco fotogrammetrico, preceduto dall'individuazione e rimozione delle corrispondenze errate (*outlier*) generate dall'operazione di matching. La presenza di errori di qualsiasi natura all'interno dei dati può provocare distorsioni nelle stime: è pertanto indispensabile in questa fase utilizzare algoritmi di stima robusti, la cui efficienza determina drasticamente la qualità dei risultati finali.

## 2.1 Estrazione e accoppiamento delle features

La ricerca dei punti di legame viene dapprima eseguita tra le possibili coppie o terne di immagini che si possono individuare all'interno del blocco, impiegando algoritmi di *feature-based matching* (FBM) in grado di estrarre informazioni invarianti rispetto a rotazioni e variazioni di scala tra le immagini. L'operazione di feature extraction è un passo fondamentale nel processamento di immagini per applicazioni fotogrammetriche e di computer vision; da essa dipendono i risultati dell'orientamento automatico e semiautomatico delle immagini. Le features devono essere ben contrastate e distinte rispetto allo sfondo e ai punti vicini e, contemporaneamente, ben distribuite entro l'immagine.

L'individuazione ed estrazione di elementi caratteristici sui diversi fotogrammi viene effettuata da operatori matematici che analizzano i valori radiometrici dell'immagine. Un efficiente operatore di interesse deve possedere proprietà di ripetibilità e di invarianza, cioè essere in grado di selezionare correttamente punti omologhi su più fotogrammi anche in presenza di rumore o variazioni prospettiche e radiometriche rilevanti tra le immagini.

Il numero di features estratte su ciascuna immagine è variabile; tra queste, alcune verranno selezionate su una sola immagine, altre saranno comuni a due o più immagini. Il FBM deve riconoscere le features omologhe, etichettandole lungo la sequenza con il medesimo identificativo, ottenendo in sostanza un insieme di dati strutturato.

Gli operatori (point detector) utilizzati tradizionalmente in fotogrammetria (Forstner e Gulch, 1987; Harris e Stephens, 1988) ricercano punti omologhi su spigoli o discontinuità radiometriche e sono invarianti rispetto a rotazioni delle features; attualmente, gli operatori più diffusi ed efficienti sono gli operatori SIFT e SURF in grado di ricercare i punti anche in presenza di problemi di occlusione e deformazione prospettiche (Lowe, 2004) risultando invarianti anche rispetto alla scala del fotogramma.

SIFT (Scale-Invariant Feature Transform – Lowe, 2004) è un algoritmo standard in molte applicazioni di Computer Vision pur essendo computazionalmente oneroso; essendo inoltre coperto da brevetto negli Stati Uniti viene in genere preferito in soluzioni non commerciali. SURF (Speeded Up Robust Features – Bay et al., 2006) si ispira in parte a SIFT ma, grazie ad alcune approssimazioni, è notevolmente più veloce di quest'ultimo, producendo risultati affidabili ma meno onerosi a livello computazionale.

SIFT e SURF associano un descrittore ad ogni feature estratta dall'immagine. Per ogni punto estratto è definito un vettore numerico che descrive i gradienti radiometrici nell'intorno del punto: cercando le coppie di vettori in cui le componenti presentano le differenze minime tra le possibili, e comunque inferiori ad una soglia, vengono individuati i punti omologhi.

## 2.2 Rimozione degli outlier

Le operazioni di matching proposte restituiscono nella maggioranza dei casi un elevato numero di punti corrispondenti, non garantendo però robustezza nella definizione delle coppie omologhe. I possibili accoppiamenti di punti omologhi errati generano errori grossolani (outlier) in percentuali incompatibili con il metodo a minimi quadrati impiegato nel bundle adjustment dell'intero blocco fotogrammetrico; è pertanto necessario ricorrere a tecniche di stima robusta per l'eliminazione degli outlier che, in quasi tutte le implementazioni, si fondano sul vincolo epipolare.

Le procedure fanno ricorso alla stima robusta della Matrice Fondamentale **F** oppure della Matrice Essenziale **E** (Hartley e Zisserman, 2003; Nister, 2004); si tratta di matrici 3x3 di rango 2 che vincolano le coordinate immagine dei punti omologhi e descrivono la geometria epipolare tra una coppia di immagini. Per la stima della Matrice Essenziale **E** è necessario conoscere i parametri di calibrazione delle camere coinvolte; diversamente, quest'ultimi figurano come incognite nella stima della Matrice Fondamentale **F** che può quindi essere utilizzata con immagini non calibrate. È dunque possibile restringere il campo di ricerca di features tra due immagini e, attraverso la stima di tali matrici, filtrare gli eventuali outlier e determinare i parametri di orientamento relativo tra le immagini senza dover conoscere valori approssimati degli stessi.

Tutti questi metodi, essendo basati sull'analisi di numerosi set di coordinate immagine estratti casualmente dall'intero data-set, necessitano all'interno della procedura di stimatori molto robusti in quanto, nel momento in cui si realizza una procedura di estrazione automatica, è possibile che nei dati siano presenti anche valori errati. Tre stimatori robusti molto diffusi sono: RANSAC, Least Median of Squares e MAPSAC (Fischler et al., 1981; Torr, 2002; Barazzetti et al., 2010c). Gli algoritmi RANSAC o MAPSAC sono in grado di elaborare dati affetti da una percentuale significativa di errori grossolani e, per questo motivo, ben si adattano all'analisi di immagini: non hanno un limite teorico alla percentuale di errori che sono capaci di individuare, pur richiedendo di fissare a priori una soglia *T* di accettazione degli inlier in accordo con la precisione dei dati.

## 2.3 Orientamento automatico

Verranno illustrati di seguito i due software Bundler e EyeDEA utilizzati per eseguire l'orientamento automatico delle sequenze di immagini nei differenti casi di studio. Le soluzioni di orientamento ottenute sono state in alcuni casi messe a confronto anche con la soluzione prodotta dal software Agisoft PhotoScan. Quest'ultimo è stato utilizzato esclusivamente quando uno dei due software analizzati non era in grado di produrre risultati soddisfacenti; essendo però un prodotto commerciale, per il quale dunque non è possibile conoscere in dettaglio le caratteristiche e le metodologie algoritmiche implementate, si è preferito in questi casi limitarsi a confronti di tipo qualitativo.

**2.3.1 Bundler:** programma scritto in linguaggio C e C++, distribuito in formato binario e sorgente per ambiente Linux e Windows. Originariamente sviluppato a partire dal progetto "Photo Tourism" (Snavely et al., 2006) e rilasciato per la prima volta nell'agosto 2008, ha subito 4 aggiornamenti fino alla versione distribuita nell'aprile 2010. Il sistema, come descritto in (Snavely et al., 2006) e in (Snavely et al., 2008), consente di ottenere una ricostruzione della geometria della scena e dell'orientamento delle camere a partire da un collezione di immagini non ordinata, analizzando due fotogrammi alla volta. La geometria della scena e l'orientamento delle camere sono calcolati attraverso tecniche fotogrammetriche e di CV: i dati EXIF delle immagini (come per esempio la lunghezza focale) sono utilizzate unicamente durante l'inizializzazione del processo, poiché sono spesso non accurate.

Il primo step di ricostruzione consiste nell'individuazione dei "feature points" in ogni immagine sfruttando l'algoritmo SIFT (Lowe, 2004). Successivamente vengono confrontati i descrittori tra ogni coppia di fotogrammi utilizzando l'algoritmo "Approximate Nearest Neighbors" (ANN) (Arya

et. al., 1998). Dopo aver analizzato una coppia di immagini viene calcolata la matrice fondamentale sfruttando l'algoritmo RANSAC: ad ogni iterazione del processo di stima la matrice viene calcolata con l'algoritmo "eight-point" (Hartley e Zisserman, 2003) e, contestualmente, vengono determinati gli outlier. Dopo aver individuato un set di corrispondenze geometricamente coerenti per ogni coppia di fotogrammi, queste vengono immagazzinate in "tracks" (set di corrispondenze ottenute unendo le coppie di punti omologhi relative ai diversi fotogrammi del blocco).

L'elaborazione a questo punto procede individuando una coppia di fotogrammi caratterizzata da un elevato numero di corrispondenze ed una estesa base di presa, così da poter garantire una ricostruzione iniziale robusta. Per valutare l'estensione della base di presa, non disponendo ancora dei parametri di orientamento esterno, viene sfruttata la proprietà proiettiva che immagini scattate dallo stesso punto di presa (o, per approssimazione, da posizioni ravvicinate) sono identiche a meno di una omografia. Vengono stimati, di nuovo tramite una procedura RANSAC, gli inlier che verificano una omografia tra i punti di legame estratti fra tutte le coppie di immagini; le coppie che presentano percentuali particolarmente elevate di inlier devono essere scartate poiché probabilmente acquisite da posizioni troppo ravvicinate fra loro. I parametri di orientamento relativo della coppia di fotogrammi vengono stimati con l'implementazione dell'algoritmo a cinque punti di Nister. I restanti fotogrammi vengono in seguito aggiunti uno alla volta, orientati per resezione con la tecnica della trasformazione lineare diretta (DLT) (Hartley e Zisserman, 2003), e dovranno essere legati al maggior numero possibile di track individuati nella coppia iniziale di immagini.

I parametri di orientamento interno vengono calcolati tramite DLT all'interno di una procedura RANSAC. Questa procedura è ripetuta per ogni fotogramma laddove si disponga di un numero sufficiente di punti utilizzabili. Segue, infine, un bundle adjustment utilizzando questo set iniziale di parametri.

**2.3.2 EyeDEA:** sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambiente e Territorio e Architettura (DICATEA) dell'Università degli Studi di Parma, è un programma completo e rigoroso per l'orientamento e la restituzione di blocchi fotogrammetrici. Presuppone l'utilizzo di camere calibrate e implementa una triangolazione aerea a stelle proiettive, permettendo inoltre l'analisi statistica dei risultati di orientamento e restituzione. È dotato di una GUI (Graphical User Interface) ed è capace di elaborare sequenze di immagini con geometrie di blocco anche piuttosto complesse, individuando autonomamente un numero elevato di tie points anche in presenza di immagini con forti deformazioni prospettiche (Roncella et al., 2011). L'estrazione delle features viene realizzata usando l'operatore e il descrittore SURF. Successivamente si impone la geometria epipolare per eliminare gli accoppiamenti erronei sfruttando, già in questa fase, l'algoritmo di Nister con il quale è possibile, a differenza di quanto avviene con la matrice fondamentale, imporre i valori noti dei parametri di orientamento interno. Questa soluzione impiega un modello matematico più complesso rispetto a quello della matrice fondamentale. Tuttavia il modello deterministico più corretto, con minori gradi di libertà, ottiene in genere una percentuale di inlier più alta, riducendo sensibilmente il numero di iterazioni che RANSAC deve effettuare per convergere alla soluzione probabilisticamente corretta.

Dato che l'imposizione della geometria epipolare non garantisce l'eliminazione di tutti gli errori presenti, EyeDEA

esegue anche un controllo sulla geometria di tre immagini consecutive (trifocale) utilizzando un RANSAC bundle - adjustment su una tripletta di immagini: vengono scelti sei punti ritenuti omologhi sui tre fotogrammi; vengono determinati i parametri di orientamento esterno tramite il metodo a stelle proiettive (imponendo i parametri di orientamento interno) e vengono valutati come outlier le corrispondenze non congruenti con la geometria di presa stimata.

**2.3.3 Agisoft PhotoScan:** Agisoft PhotoScan è un software commerciale di CV sviluppato dalla società Agisoft LLC, finalizzato alla generazione di modelli digitali di superficie in maniera completamente automatizzata. Il software è in grado di generare buoni risultati con immagini acquisite sia con una geometria di blocco preventivamente ben progettata sia in condizioni arbitrarie e non controllate; i fotogrammi possono essere scattati da qualsiasi posizione. Le procedure di orientamento dei fotogrammi e costruzione del modello 3D si articolano in due fasi principali: in un primo momento PhotoScan esegue la Structure From Motion definendo l'orientamento di ogni immagine del blocco e affinando i parametri di calibrazione della fotocamera (se questi non sono stati precedentemente fissati); in questa fase il software può procedere con un approccio più simile a quello implementato in EyeDEA, sfruttando una struttura regolare a sequenza del blocco di immagini, oppure valutare tutti gli accoppiamenti possibili fra le coppie stereoscopiche analogamente a quanto viene fatto nel flusso operativo di Bundler. In una seconda fase il programma procede alla generazione del DSM a partire dai punti di legame estratti.

L'intervento dell'operatore durante le fasi di orientamento e generazione del modello è minimo e si concretizza perlopiù nella scelta della densità della nuvola di punti da estrarre e della qualità desiderata della modellazione; il flusso di lavoro è quindi estremamente intuitivo e consente agli utenti meno esperti un utilizzo immediato del software fornendo anche un'agevole ed accattivante visualizzazione dei risultati prodotti. Di contro, la capacità di intervento sul processo ed eventualmente di analisi e correzione dei risultati è molto limitata.

#### 2.4 Orientamento del blocco e generazione del DSM

Pur essendo entrambi i pacchetti software (EyeDEA e Bundler) in grado autonomamente di calcolare la soluzione di orientamento e le coordinate terreno dei punti omologhi del blocco tramite una procedura di bundle adjustment, si è preferito utilizzare una piattaforma esterna comune (Eos System PhotoModeler) per l'orientamento a stelle proiettive. In questo modo i risultati dipendono esclusivamente dalla qualità, quantità e distribuzione dei punti di legame individuati dai due applicativi sottoposti a valutazione (o meglio l'influenza del processo di compensazione del blocco può essere ritenuta identica per entrambi). Una volta noti i parametri di orientamento dei fotogrammi e una serie di punti terreno sulla superficie dell'oggetto, la generazione dei DSM è stata anch'essa effettuata con il medesimo codice di calcolo DenseMatcher (Re et al. 2012). Il software, sviluppato dall'Università degli Studi di Parma, implementa 3 algoritmi di correlazione: NCC (*Normalized Cross Correlation*), LSM (Least Squares Matching - Gruen, 1984) e MGCM (*Multiphoto Geometrically Constrained Matching* - Grün e Baltsavias, 1988). I differenti test eseguiti, che verranno presentati nel prossimo capitolo e che considerano diverse condizioni applicative, sono stati elaborati in questa fase

utilizzando, per entrambe le soluzioni di orientamento, gli stessi parametri per la generazione del modello 3D. Per rendere la fase di matching più affidabile ed efficiente è stato utilizzato un approccio multi-risoluzione con una

piramide di immagini a 3 livelli. Dai dati di orientamento relativo il programma produce un ricampionamento epipolare.

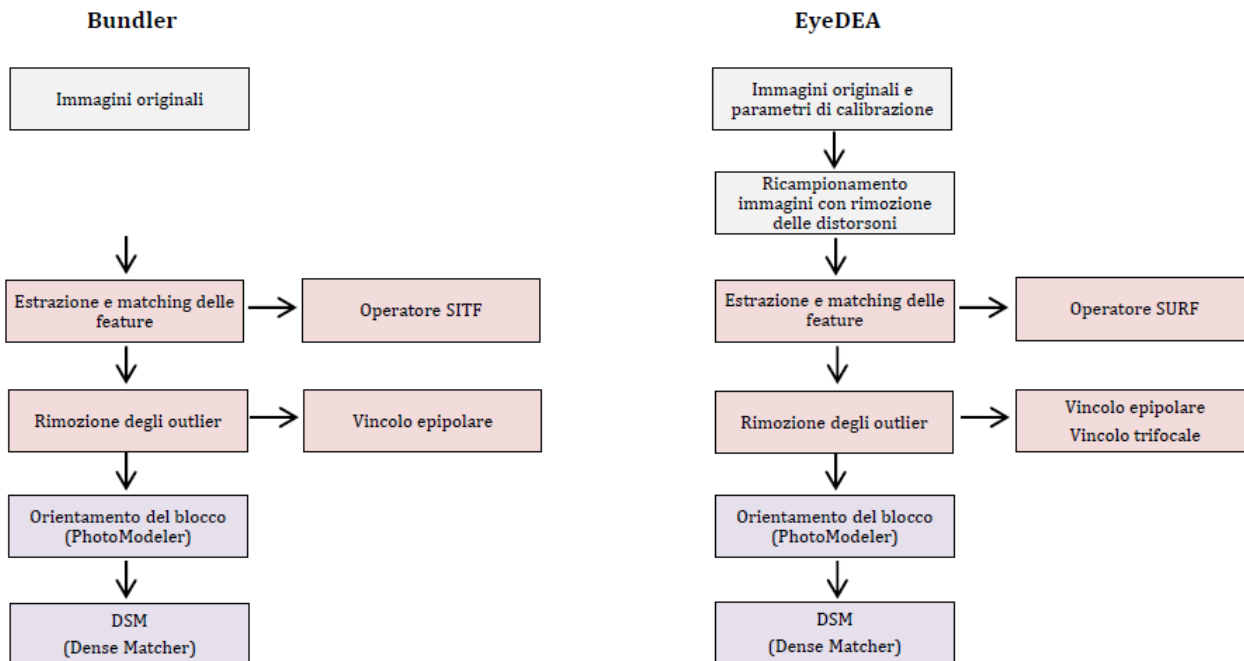


Figura 1. Flusso di elaborazione dei test comparativi con i due software.

Per fornire informazioni iniziali sulla posizione dei punti corrispondenti vengono utilizzati innanzitutto i dati ricavabili dai punti di legame ottenuti durante la fase di orientamento del blocco. Viene quindi calcolata per interpolazione una mappa delle parallassi che viene successivamente raffinata da una ulteriore ricerca iniziale delle corrispondenze tramite algoritmo NCC. Viene quindi impiegato l'algoritmo LSM con una procedura di matching denso di tipo parallelo (impostato in tutte le prove realizzate con soglia di correlazione pari a 0.9 e una template di dimensione pari a 13 pixel) per ottenere le corrispondenze finali. Infine, tramite triangolazione dei punti omologhi ottenuti, si ottiene la nuvola di punti e il DSM dell'oggetto rilevato.

In Figura 1 è mostrato il flusso delle elaborazioni eseguite per entrambe le soluzioni di orientamento. L'elaborazione con EyeDEA, presupponendo l'utilizzo di fotogrammi calibrati, ha richiesto in input i parametri di calibrazione delle fotocamere utilizzate e le immagini ricampionate con DistRemover (sviluppato presso DICATeA) per rimuoverne la distorsione. Diversamente Bundler ha permesso di utilizzare direttamente le immagini originali in quanto il programma, come precedentemente citato, stima i parametri con metodi di auto-calibrazione. I punti di legame identificati con i due software sono stati caricati in PhotoModeler grazie al quale si sono determinati i parametri di orientamento del blocco; infine, dai dati ottenuti, si è proceduto alla creazione dei DSM in DenseMatcher. I DSM ottenuti dalle soluzioni di orientamento generate da Bundler e EyeDEA sono stati infine messi a confronto come verrà illustrato nel prossimo paragrafo.

### 3. TEST COMPARATIVI

Per rilevare le principali differenze computazionali e prestazionali tra i due sistemi di orientamento automatico e poter identificare la qualità dei risultati ottenuti dal punto di vista metrologico, saranno presentati 5 casi di studio. In molti ambiti applicativi e soprattutto nel caso di un'utenza non specialistica difficilmente vengono realizzati rilievi di controllo che possano assicurare la reale qualità dei dati misurati. In compenso, dai dati e dalle statistiche di orientamento (residui delle equazioni, ridondanza, etc.) è possibile farsi un'idea della stabilità e rigidità del blocco: nella sperimentazione si è voluto valutare il grado effettivo di rispondenza fra qualità emersa da tali indicatori ed effettiva rispondenza metrica del prodotto finale.

L'utilizzo di PhotoModeler ha permesso di estrarre, dalle soluzioni di orientamento di ciascun blocco, una serie di indicatori qualitativi attraverso i quali si è cercato di verificare se, e in quali condizioni, tali parametri consentano effettivamente di valutare l'accuratezza dei risultati. Sono stati messi in evidenza la quantità di punti estratti per immagine ("Punti per Fotogramma"), ad indicare la ridondanza complessiva del sistema di equazioni di collinearità, e la distribuzione di questi tra i diversi fotogrammi del blocco ("Copertura del Fotogramma %", ovvero l'area di fotogramma coperta da punti di legame). Le informazioni riguardanti l'angolo di intersezione dei raggi sui punti omologhi ("Angolo di Intersezione") hanno contribuito a migliorare le valutazioni complessive sulla robustezza geometrica dei blocchi analizzati e, infine, a tali dati si è affiancato il valore dei residui sulle equazioni di collinearità (" $\sigma_0$ " – sigma zero) ottenuto al termine della compensazione.

Per l'orientamento dei blocchi nel sistema di riferimento terreno si è scelto di eseguire solamente una rototraslazione con variazione di scala usando tre punti ("soluzione di minimo vincolo"); si è preferito orientarsi verso questa soluzione per non andare ad influenzare, tramite l'inserimento di punti d'appoggio, la geometria dei blocchi ricostruiti e poter avere una soluzione finale di orientamento in cui l'influenza del processo di compensazione del blocco fosse minima, o perlomeno identica, per entrambe le soluzioni.

Al fine di valutare la coerenza tra i DSM prodotti con le due soluzioni Bundler e EyeDEA, i confronti si sono concentrati essenzialmente sull'analisi delle differenze di forma dei modelli 3D ricostruiti. Avendo riscontrato, in quasi tutti i casi studiati, un'evidente rotazione tra i due modelli, l'analisi delle differenze locali di forma tra i DSM è stata realizzata solamente a seguito di una procedura di allineamento con ICP (Iterative Closest Point). Non accontentandosi delle valutazioni di coerenza dedotte dai confronti tra i DSM, i casi di studio meno soddisfacenti sono stati ulteriormente messi a confronto con DSM laser di riferimento laddove disponibili.

### 3.1 Miniera di New South Wales

Il primo caso prende in esame una parete di roccia che sormonta una miniera di carbone a cielo aperto situata nell'Hunter Valley del New South Wales in Australia. Sono state messe a disposizione, dai gestori dell'attività estrattiva, le immagini e i dati relativi a rilievi precedentemente realizzati, costituiti da 12 immagini di calibrazione, 121 immagini della parete di roccia e dalle coordinate terreno di alcuni punti di controllo. Le immagini, di 3776 x 2520 pixel di risoluzione, sono state scattate ad una distanza media dalla parete di 35-40 m, in modo da consentire un buon inquadramento dell'area da rilevare (complessivamente di circa 1680 m<sup>2</sup>).

Per l'elaborazione con Bundler sono state utilizzate tutte e 121 le immagini senza effettuare una selezione o una riorganizzazione di quest'ultime; diversamente, in EyeDEA è stato necessario individuare 3 sottogruppi di immagini ordinate lungo una sequenza. In Figura 2 sono mostrati l'orientamento delle camere e i tie points estratti, a seguito del processo di orientamento automatico del blocco con entrambi i software.

		Bundler	EyeDEA
Punti totali		2391	922
$\sigma_0$		1.334	0.832
Punti per Fotogramma	Min	6	58
	Max	279	565
	Media	161	240
Copertura del Fotogramma (% Area)	Min	5	4
	Max	87	71
	Media	56	45
Angolo di Intersezione	Min	2	0
	Max	89	89
	Media	37	11

Tabella 1. Indicatori qualitativi del blocco fotogrammetrico

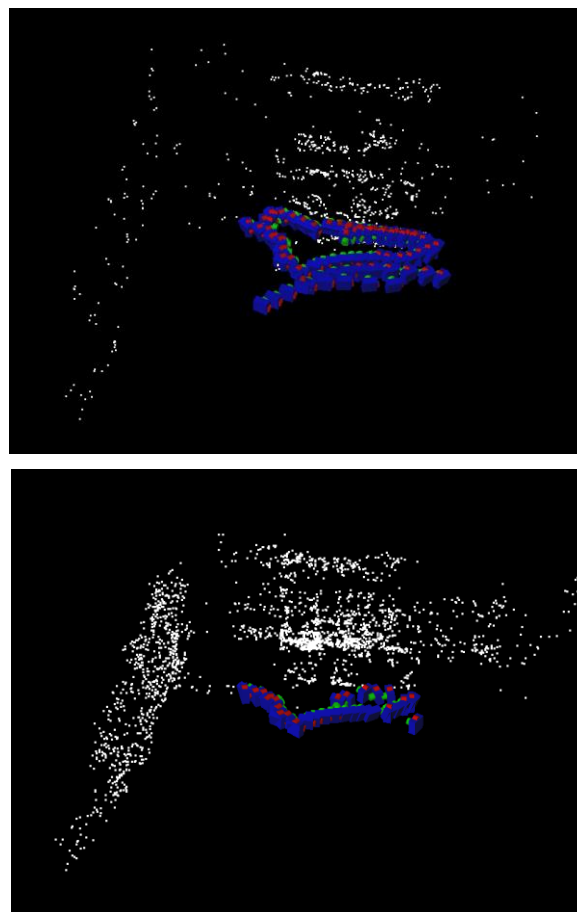


Figura 2. Orientamento della sequenza della parete di roccia elaborato con Bundler (sopra) e con EyeDEA (sotto).



Figura 3. Immagine della parete di roccia e della rete metallica di contenimento per caduta massi

La presenza di una rete metallica sulla facciata centrale della miniera (come evidenziato in Fig. 3) non sembra aver generato difficoltà nell'individuazione dei punti, come

inizialmente temuto, né per l'algoritmo SIFT né per SURF, ottenendo punti all'interno delle maglie che presentano un errore compatibile con gli altri punti del modello. Complessivamente gli indicatori non manifestano situazioni di criticità se non per il valore medio dell'angolo di intersezione tra i raggi che in EyeDEA è decisamente basso. Questo fenomeno con una certa probabilità è dovuto al fatto che il software, a differenza di Bundler, non genera legami tra tutte le possibili coppie di immagini ma lavora solo per triplette di immagini consecutive; è quindi ammissibile che si siano riscontrate piccole basi di presa tra talune coppie di immagini.

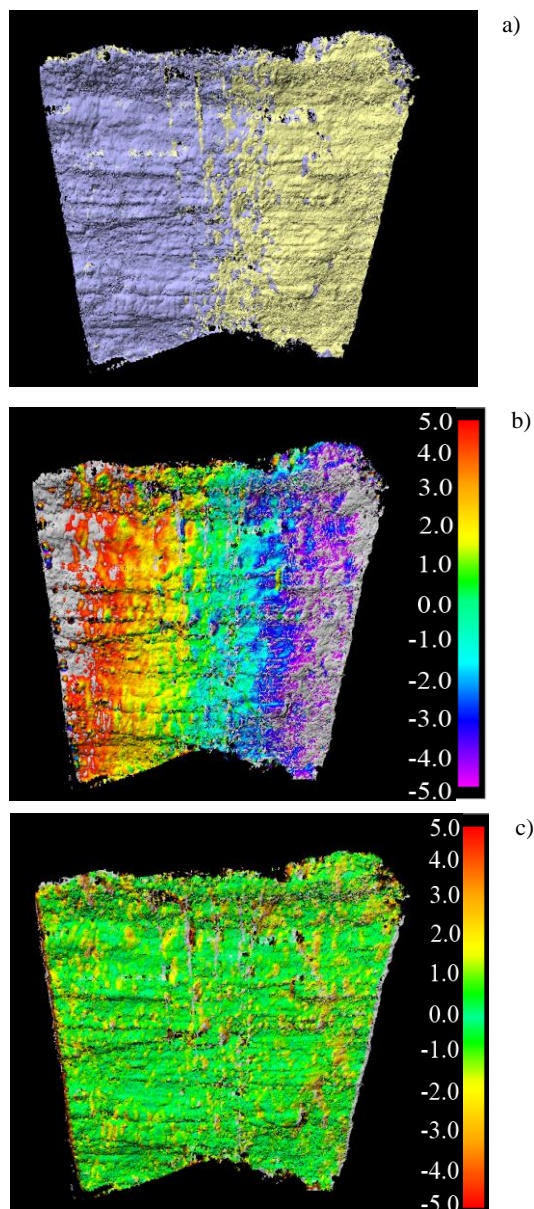


Figura 4. a) Sovrapposizione del modello tra Bundler (in viola) e EyeDEA (in giallo). b) Mappa di distanza (in cm) dei modelli Bundler e EyeDEA prima dell'allineamento. c) Mappa di distanza (in cm) dei modelli Bundler e EyeDEA dopo l'allineamento.

In Figura 4 si riportano in ordine: la sovrapposizione tra i DSM ottenuti con i software Bundler e EyeDEA (a) e la mappa delle differenze di forma tra i modelli, valutata prima e dopo l'allineamento con ICP (b e c).

Esaminando le differenze di forma locali tra i due DSM a seguito dell'allineamento (Fig. 4 c), si osserva che le variazioni massime sono di circa 1 cm (in verde in Fig. 4 c), compatibilmente con l'ordine di grandezza dell'errore medio che ci aspetteremmo sui singoli modelli (al fine di evidenziare che buona parte delle discrepanze tra i DSM sono contenute entro il range di +/- 1 cm, si è scelto di visualizzare i risultati con un'opportuna scala di colori). Vi è quindi una buona coerenza tra i DSM anche se, non disponendo in questo caso di un dato di controllo, non si è potuto procedere ad un ulteriore e più accurato confronto.

### 3.2 Chiesa di Herzjesu

I prossimi casi di studio, presentati nei paragrafi 3.2.3.3 e 3.4, sono sequenze di immagini, estratte dal cvlab dataset (Stretcha et al., 2008), realizzate con camera digitale Canon D60 con focale 20 mm e 3072 x 2048 pixel di risoluzione. Il blocco fotogrammetrico in esame (Stretcha et al., 2008 - HerzJesu-P25) ritrae la parte inferiore della facciata di una chiesa di 12 m in larghezza e 6 m in altezza (Fig. 6); le immagini sono state acquisite con passo regolare di circa 3 m, a 10- 12m di distanza dalla facciata.

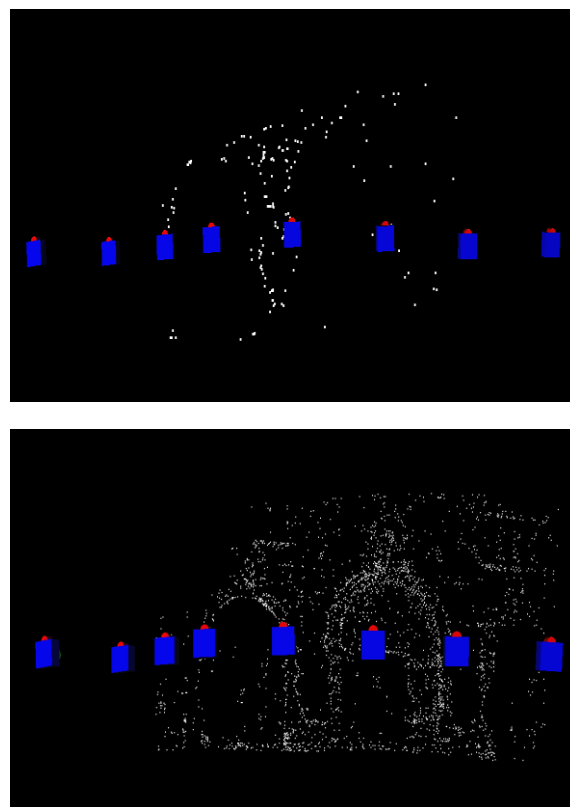


Figura 5. Orientamento della sequenza di Herzjesu elaborato con Bundler (sopra) e con EyeDEA (sotto).

I dati presentati in Tabella 2 mostrano che entrambi i software hanno portato a termine l'orientamento con successo, con il medesimo sigma zero, sebbene i punti estratti da Bundler, oltre ad essere decisamente meno numerosi di quelli estratti da EyeDEA, si dispongono unicamente sul piano principale della facciata della chiesa (dato percepibile anche in Figura 5 dove è chiara la geometria dei due blocchi ricostruiti). In termini di copertura dei fotogrammi e angolo di intersezione, i risultati mostrano differenze di un certo

rilievo solamente sull'angolo di intersezione, senza che vi siano valori critici.

		Bundler	EyeDEA
Punti totali		179	2690
$\sigma_0$		0.582	0.582
Punti per Fotogramma	Min	36	401
	Max	176	1777
	Media	101	1227
Copertura del Fotogramma (% Area)	Min	33	54
	Max	73	90
	Media	60	80
Angolo di Intersezione	Min	14	8
	Max	74	75
	Media	39	25

Tabella 2. Indicatori qualitativi del blocco fotogrammetrico.

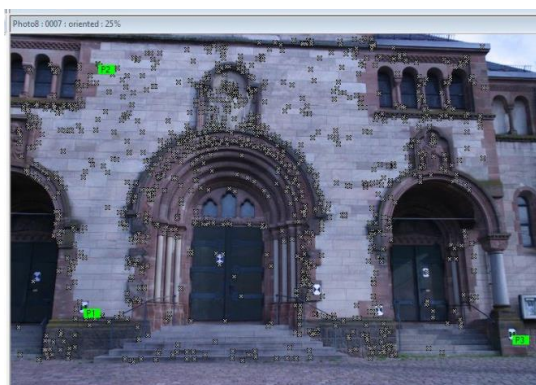
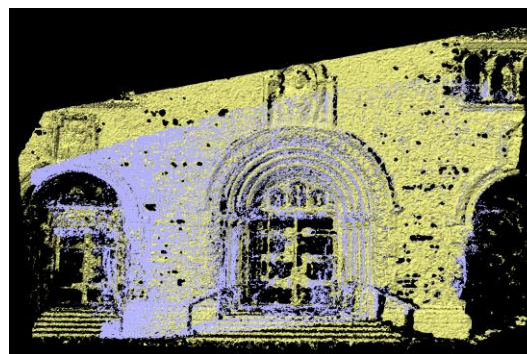


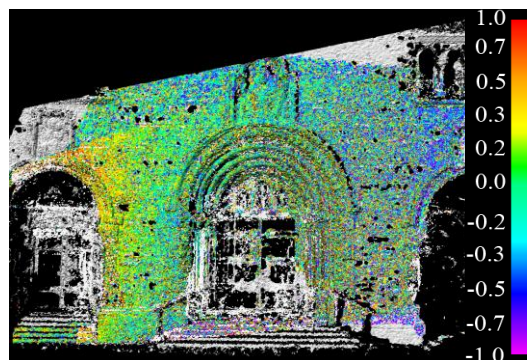
Figura 6. Immagine rappresentativa della chiesa di Herzjesu in cui sono visibili i punti scelti per eseguire la rototraslazione

Anche in questo caso la rotazione tra le due nuvole di punti è evidente, come mostrato in Figura 7 (a) e Figura 7 (b). A seguito dell'allineamento, si mostra un lieve ingobbimento tra i modelli ma le differenze massime riscontrate sono di circa 3 mm.

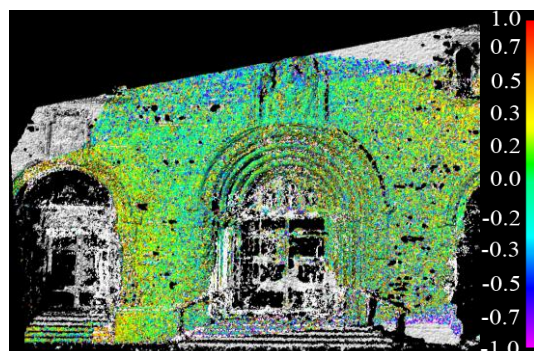
Per verificare l'aderenza dei dati ottenuti ad un modello di riferimento, si è proceduto al confronto dei modelli digitali con un DSM di riferimento ottenuto da scansione laser, resa anch'essa fruibile e disponibile all'interno del dataset. I dettagli relativi alla strumentazione laser utilizzata sono riportati in Stretcha et al., (2008). Le soluzioni Bundler e EyeDEA sono state rispettivamente allineate e confrontate con la nuvola di punti laser mostrando lo stesso grado di adesione al modello di confronto; è quindi evidente il buon funzionamento di entrambi i metodi.



a)



b)



c)

Figura 7. a) Sovrapposizione del modello tra Bundler (in viola) – EyeDEA (in giallo). b) Mappa di distanza (in cm) dei modelli Bundler e EyeDEA prima dell'allineamento. c) Mappa di distanza (in cm) dei modelli Bundler e EyeDEA dopo l'allineamento.

### 3.3 Fontana

Il secondo caso estratto dal cvlab dataset (Stretcha et al., 2008 - Fountain-P11) è una sequenza semi-circolare di 11 immagini che riprendono una fontana di 5 m di altezza, ricca di decori e piccoli dettagli, ed il muro retrostante (vedi Fig. 9). Le immagini sono state scattate con la medesima camera digitale utilizzata nel caso precedente, avente la risoluzione di 3072 x 2048 pixel, a circa 8 m di distanza.

In questo caso, sia gli indicatori riportati in Tabella 3 che le immagini in Figura 8, mostrano che Bundler, oltre ad aver estratto molti meno punti rispetto a EyeDEA, non è riuscito ad estrarre punti nelle zone caratterizzate da variazioni di profondità, creando un insieme di punti complanari.



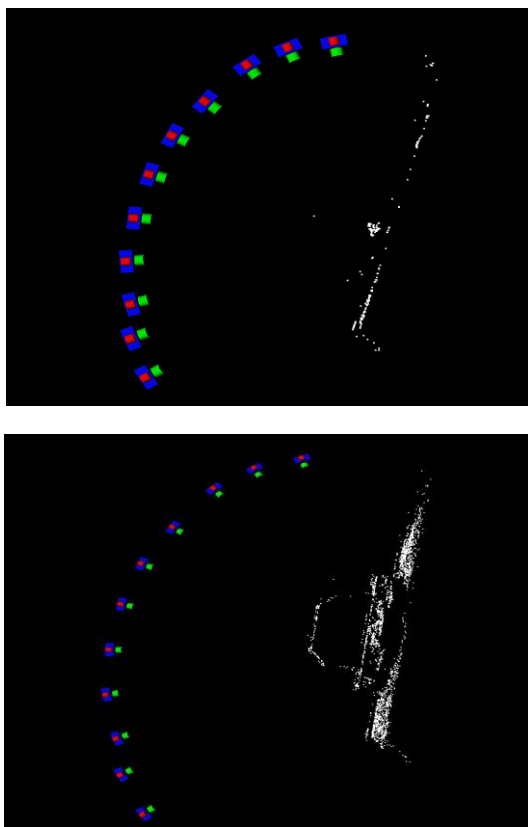


Figura 8. Orientamento della sequenza della Fontana realizzato con Bundler (sopra) e EyeDEA (sotto).

		Bundler	EyeDEA
Punti totali		371	2428
$\sigma_0$		0.391	0.452
Punti per Fotogramma	Min	23	495
	Max	158	1169
	Media	117	889
Copertura del Fotogramma (% Area)	Min	29	56
	Max	88	85
	Media	62	74
Angolo di Intersezione	Min	5	15
	Max	89	89
	Media	20	33

Tabella 3. Indicatori qualitativi del blocco fotogrammetrico.

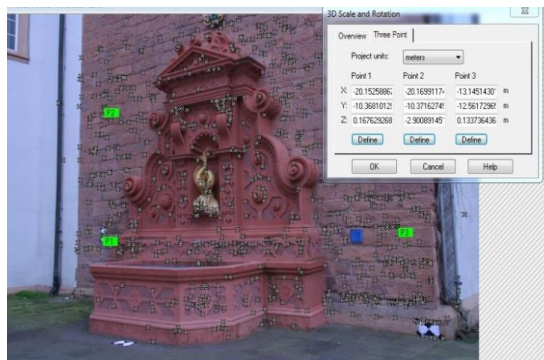


Figura 9. Immagine rappresentativa della fontana in cui sono visibili i punti scelti per eseguire la rototraslazione.

I parametri qualitativi del blocco appaiono però sostanzialmente simili a quelli ottenuti nel caso precedente (Tabella 2 - Herzjesu), lasciando quindi presumere l'ottenimento di DSM precisi ed accurati anche da questa sequenza di immagini.

Il confronto tra i DSM (Fig. 10) mostra però conclusioni ben differenti: tra le due soluzioni si sono verificati fino a 5 cm di differenza per la soluzione non allineata, ridotti a 2 cm a seguito dell'allineamento. Con riferimento alla mappa di distanza tra i modelli allineati (Fig. 10 b) il gradiente di colore consente di evidenziare la rotazione tra i modelli che, anche a seguito dell'allineamento, mostrano deformazioni non trascurabili. Ci troviamo di fronte in questo caso a differenze di ricostruzione e deformazioni abbastanza importanti. La spiegazione più plausibile è che la complanarità dei punti estratti da Bundler ha determinato una forte correlazione fra i parametri di orientamento dei fotogrammi generando errori di difficile individuazione analizzando esclusivamente i dati del blocco fotogrammetrico.

Si può quindi evincere che i descrittori statistici, generalmente d'aiuto per la valutazione della qualità geometrica dei blocchi orientati, non sempre consentono di individuare effettivamente l'accuratezza dei risultati ottenuti. Parametri qualitativi molto simili, se non identici, hanno dato luogo a risultati accurati, oltre che affidabili, nella modellazione della chiesa di Herzjesu mentre si sono ottenuti risultati diversi in quest'ultimo caso, evidenziando la necessità e l'importanza di disporre di un dato di controllo per identificare la modellazione più affidabile. I DSM sono quindi stati messi a confronto con il DSM laser di riferimento, ottenendo i risultati mostrati in Figura 11.

Il confronto con i dati di controllo ha mostrato che, mentre il modello riprodotto con EyeDEA discosta mediamente 2 mm dal DSM laser di riferimento, escluse le zone di dettaglio della fontana dove l'errore aumenta fino al cm (anche in questo caso, vedi Fig. 4 c, si è utilizzata una scala di colori idonea a mettere in evidenza i risultati ottenuti), il modello generato con Bundler appare decisamente deformato e le differenze di forma con il DSM laser sono più evidenti, raggiungendo in varie zone circa 1,5 cm di errore. Da tale confronto sembrerebbe emergere che l'utilizzo dei parametri di calibrazione apporta effettivamente delle differenze nella soluzione che traducono in miglioramenti del modello finale 3D. Per completare la valutazione del caso, si è studiato anche il risultato prodotto da PhotoScan con questo stesso set di dati. Il software è stato adoperato in due differenti condizioni:

1. vincolando i parametri di calibrazione della camera (noti ed utilizzati anche nelle precedenti prove);
2. eseguendo una full field calibration, con cui sono stati stimati automaticamente i parametri di calibrazione per ogni fotogramma.

Le due soluzioni sono state poi confrontate con la scansione laser per verificare la qualità della ricostruzione (Fig. 12) e le differenze con i modelli precedenti.

Le elaborazioni con PhotoScan hanno confermato le considerazioni emerse in precedenza sull'importanza dell'utilizzo dei parametri di calibrazione all'interno delle operazioni di Structure From Motion; è infatti evidente la differenza dei risultati che si sono ottenuti con il software. Nel primo caso (Fig.12 in alto) la modellazione è accurata e coerente con il dato di controllo laser, mostrando variazioni di forma di lieve entità e dello stesso ordine di grandezza di quelle riscontrate nel DSM prodotto con EyeDEA (Fig. 11). Diversamente, nel secondo caso (Fig. 12 in basso), tali

variazioni raggiungono i 2 cm ed il modello appare indubbiamente ruotato.

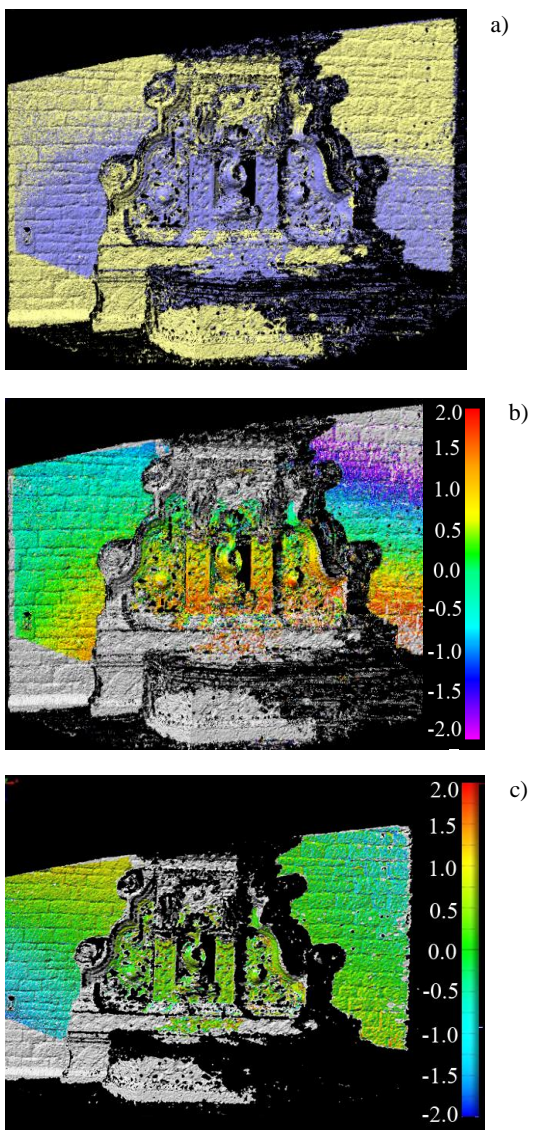


Figura 10. a) Sovrapposizione del modello tra Bundler (in viola) – EyeDEA (in giallo). b) Mappa di distanza (in cm) dei modelli Bundler e EyeDEA prima dell'allineamento. c) Mappa di distanza (in cm) dei modelli Bundler e EyeDEA dopo l'allineamento.

A questo punto si pone come indispensabile l'analisi critica dei risultati ottenibili con le differenti soluzioni di orientamento automatico. Infatti, sebbene la maggior parte delle volte i modelli 3D appaiano completi e dettagliati, non incoraggiando quindi la formulazione di dubbi e domande sull'efficacia del processo di restituzione avvenuto, si è mostrato in questo caso che l'automazione del software non ha prodotto le precisioni attese.

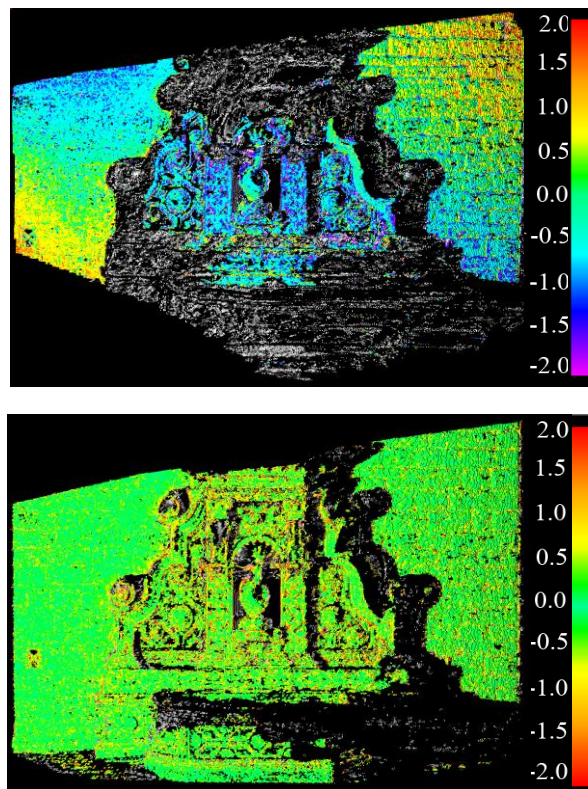


Figura 11. Confronto (distanze in cm) tra scansione laser e DSM fotogrammetrico ricostruito con Bundler (sopra) e tra scansione laser e DSM fotogrammetrico ricostruito con EyeDEA (sotto).

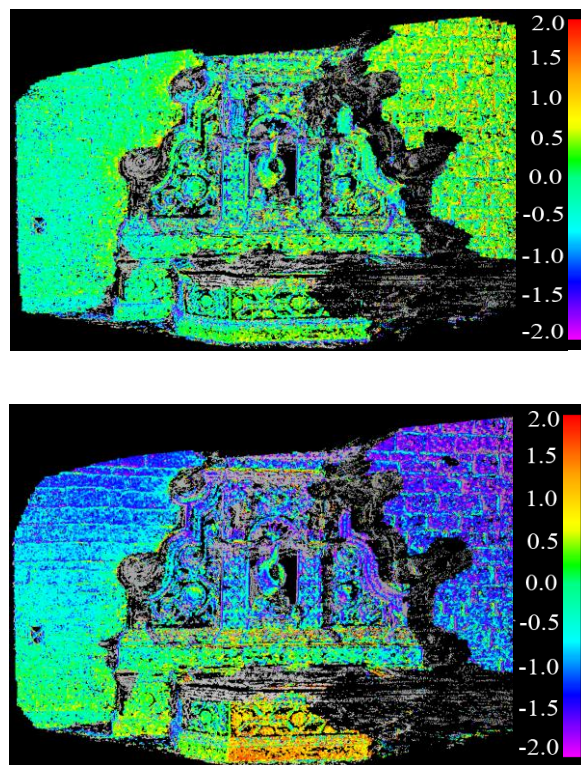


Figura 12. Confronto (distanze in cm) tra scansione laser e DSM ricostruito con PhotoScan con parametri di calibrazione noti (sopra) e parametri di calibrazione stimati (sotto).

### 3.4 Castello di Ettlingen

L'ultimo caso (Stretcha et al., 2008 - Castle-P19) è descritto da una sequenza di 19 fotogrammi che inquadra la corte rettangolare interna del castello di Ettlingen nel Baden-Württemberg (Germania) di 27 m x 16 m di lato; gli edifici presentano facciate di circa 8 m di altezza.

La Figura 13 mostra che Bundler non è riuscito orientare la sequenza e quindi produrre il DSM mentre il numero e la disposizione dei punti di legame individuati da EyeDEA, pur non del tutto omogenei, consente una buona ricostruzione del modello 3D.

Probabilmente, intervenendo per tentativi sui parametri di processamento di Bundler, si sarebbero potuti ottenere risultati migliori, anche in grado di permettere la realizzazione del DSM: il dover tuttavia ripetere più volte la procedura di orientamento fino al raggiungimento di un risultato accettabile vanifica buona parte dei vantaggi di utilizzare algoritmi automatici; non si può dunque trascurare il risultato ottenuto.

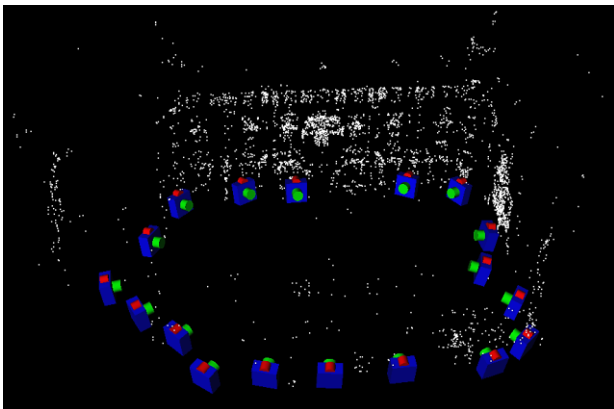
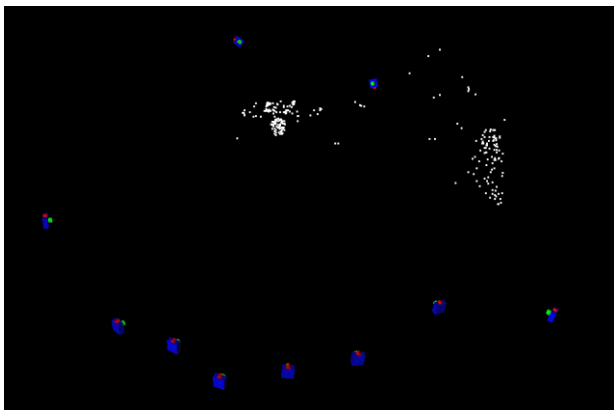


Figura 13. Orientamento della sequenza della Fontana realizzato con Bundler (sopra) e EyeDEA (sotto).

I risultati poco convincenti ottenuti sono stati quindi messi a confronto anche con la soluzione ottenuta in PhotoScan.

In Figura 14 è mostrato il modello 3D riprodotto con EyeDEA (sopra) e PhotoScan (sotto); mentre il primo presenta lacune sul tetto e lungo alcune zone di due facciate, il secondo ha prodotto un modello completo con impostazioni di elaborazione standard. È presumibile che PhotoScan, come la maggior parte dei software di CV, possieda delle funzioni di interpolazione interne che tendano a lisciare le superfici triangolate generando un risultato di elevata qualità dal punto di vista estetico (fenomeno che invece cerchiamo di eludere con procedure di modellazione controllate per evitare di

nascondere le zone ove si sono verificate imprecisioni durante la triangolazione).



Figura 14. Modello 3D da Dense Matcher con la soluzione di orientamento di EyeDEA (sopra) e da PhotoScan (sotto).

### 3.5 Tempio di St. Jean

Per completare il lavoro svolto sono state condotte ulteriori prove, anche su un altro caso di studio, provando ad utilizzare anche il software PhotoScan. La sequenza di 66 immagini del piccolo tempio circolare sito in St. Jean, ampiamente utilizzata in letteratura come dataset per applicazioni fotogrammetriche (Pierrot-Deseilligny, 2011), descrive una cupola sostenuta da archi e colonne, inserita all'interno di un cortile. Le acquisizioni girano intorno all'oggetto per poi entrare sotto la cupola al fine di rilevarne anche l'intradosso.

Le immagini sono state acquisite con camera digitale Nikon D3X (risoluzione di 6255 x 4175 pixel) con focale di 20 mm. L'elaborazione della sequenza di immagini, pur avendo restituito buoni risultati sia con EyeDEA sia con Bundler (vedi Fig. 15), ha invece manifestato alcune anomalie nei risultati prodotti da PhotoScan. Infatti in questo caso l'orientamento di alcune immagini del blocco ha dapprima generato le due situazioni errate visibili in Figura 16: il fallimento degli operatori di SfM ha determinato in un primo caso la ricostruzione di un oggetto di forma piana, non certamente compatibile con la struttura cilindrica del tempio (Fig. 16 in alto); in una seconda prova si sono resi evidenti i problemi durante la fase di riconoscimento e accoppiamento delle features, che hanno condotto alla stima di punti errati o all'infinito (Fig. 16 in basso). Si è poi raggiunta la soluzione corretta (Fig. 15 c)

utilizzando l'intera sequenza di immagini e selezionando opportunamente i fotogrammi migliori nelle zone del blocco in cui si manifestavano maggiormente i problemi.

I risultati, come già evidenziato nelle precedenti analisi, in molti casi sono stati più che soddisfacenti; tuttavia il caso in esame ha di nuovo mostrato come strumenti di orientamento automatico ideati per consentirne l'utilizzo anche ad operatori inesperti, non sempre raggiungono risultati corretti.

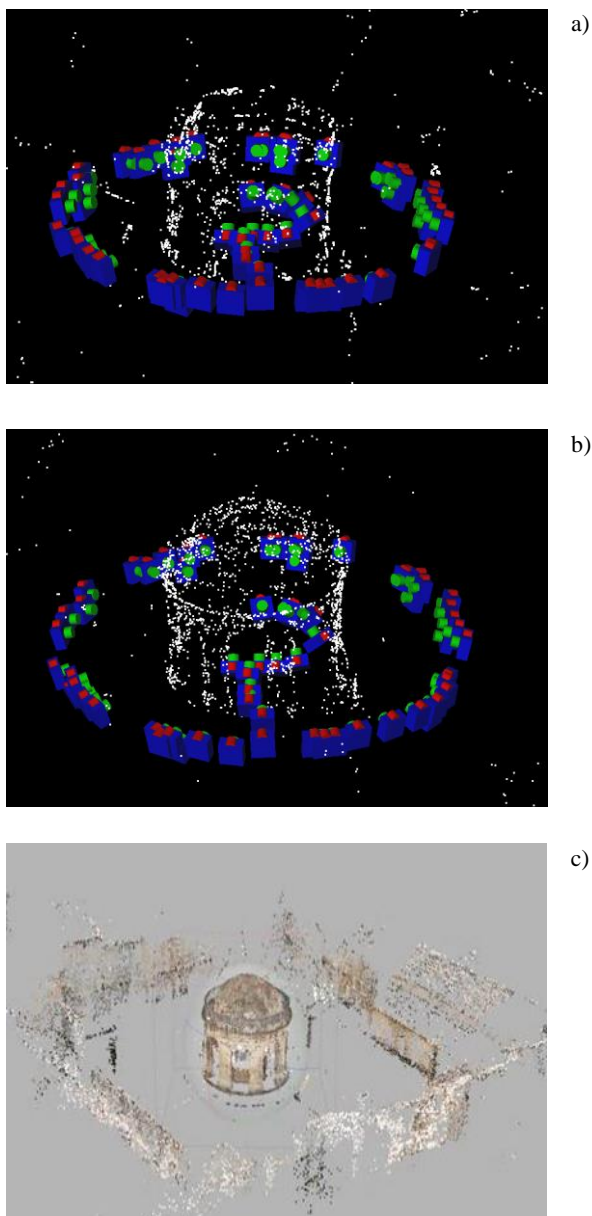


Figura 15. Orientamento automatico con Bundler a) EyeDEA b) PhotoScan c).

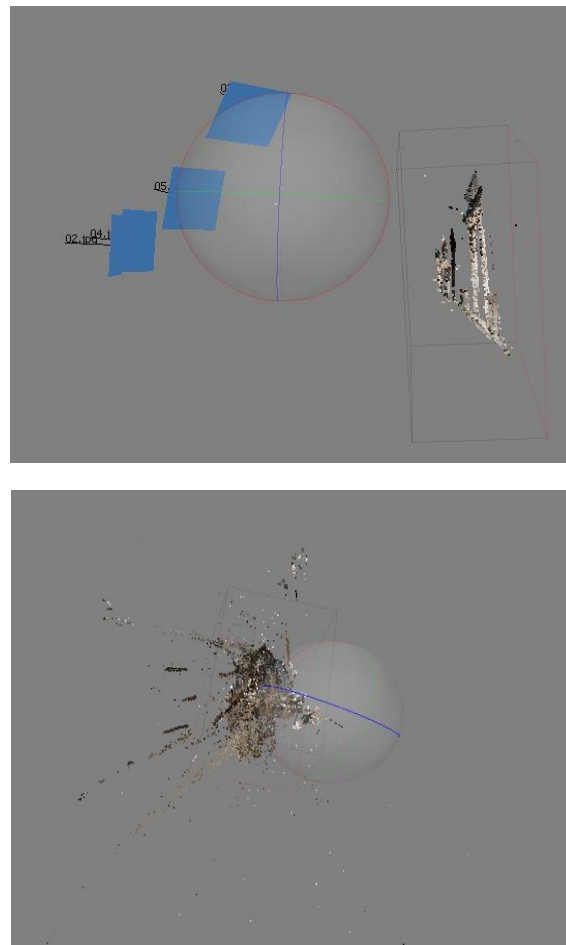


Figura 16. Fallimenti durante la procedura di orientamento automatico con PhotoScan

### 3.6 Considerazioni sui test comparativi

Alla luce di tutti i casi di studio analizzati, riteniamo, dunque, che l'individuazione di criteri generali di accettazione dei risultati (eventualmente utilizzabili a loro volta all'interno di procedure automatiche) risulti ancora un miraggio. Nel valutare i risultati dei test comparativi è importante, oltre alle statistiche del blocco (ridondanza, norma dei residui, ricoprimento dei fotogrammi, etc.) considerare anche altri aspetti di più difficile interpretabilità da parte dell'utente non esperto. Ad esempio la disposizione spaziale dei punti oggetto può in alcuni casi condurre ad un indesiderato accoppiamento dei parametri di orientamento producendo soluzioni degeneri. Come esposto in Hartley e Zisserman (2003), nell'elaborazione di una coppia di immagini, molti algoritmi di SfM calcolano la matrice fondamentale (che determina i vincoli geometrici epipolari). Condizione degenera per la stima della matrice fondamentale tuttavia è la presenza di punti complanari, condizione che nel nostro caso si verificava nelle sequenze di Herzjesu e della Fontana. In quest'ultimo caso, sebbene gli indicatori di qualità dei blocchi non mostrassero valori critici o comunque sospetti, solo il dato di confronto laser ha consentito di mettere in evidenza scostamenti superiori al cm. Anche la rumorosità del DSM e la mancata ricostruzione della base della fontana e di parti della parete retrostante, in cui questa è inserita, sono indici di un orientamento non soddisfacente. E' singolare a questo riguardo il caso Herzjesu, che presenta una geometria di blocco molto simile (semicircolare) produce modelli

accurati con differenze con EyeDEA e con la scansione di confronto dell'ordine di qualche millimetro. La correlazione fra parametri non necessariamente conduce a soluzioni errate. Nel caso del Castello, Bundler non è riuscito a riconoscere punti omologhi in un certo numero di immagini, compromettendo l'orientamento della sequenza e, conseguentemente, la generazione del DSM. E' peraltro probabile che, intervenendo sui parametri di elaborazione, sia possibile ottenere una soluzione soddisfacente. Sebbene vi siano cambiamenti di prospettiva importanti e tessiture non ottimali per la fase di matching, non è evidente il motivo per cui la sequenza non sia stata elaborata almeno parzialmente dal software.

## CONCLUSIONI

Si è presentato un confronto tra due diverse strategie di orientamento di blocchi fotogrammetrici basati su approcci analitici e metodologici per alcuni aspetti molto differenti: da un lato EyeDEA, basato su un approccio fotogrammetrico più rigoroso, dall'altro Bundler e PhotoScan, software provenienti dal settore della CV, che puntano ad ottenere prodotti 3D finali con una certa facilità e rapidità di esecuzione e soprattutto senza conoscenze a priori (parametri di calibrazione, etc.).

Partendo dal presupposto che i software nascono per scopi e applicazioni differenti, i due procedimenti hanno mostrato in alcuni casi soluzioni coerenti, in altri casi si sono riscontrati risultati confusi e di difficile interpretazione.

Agisoft PhotoScan, un programma che sta godendo di un'ottima diffusione in questi ultimi anni, soprattutto fra gli utilizzatori meno specialistici, ha restituito modelli 3D completi e dettagliati (vedi Fontana e Castello). Tuttavia laddove si sono potute confrontare le soluzioni ottenute con modelli di riferimento, non sempre si è constatata una buona rispondenza delle precisioni, soprattutto quando il programma funziona in modalità auto-calibrazione. Questo è ben rappresentato, in particolare, dal caso della Fontana, in cui le differenze con il DSM di riferimento superano anche i 3 cm. È importante ribadire che risultati diversi si sono ottenuti processando lo stesso set di dati, ma vincolando i parametri di calibrazione della fotocamera (e quindi non consentendo al software di stimare autonomamente quest'ultimi). Infatti in tali condizioni il DSM generato da PhotoScan si è dimostrato coerente con i dati di controllo, con minime differenze di forma locali.

In conclusione, ad un primo approccio, i sistemi di orientamento automatico valutati hanno mostrato capacità sostanzialmente simili, anche se non identiche, in quasi tutti i blocchi elaborati, in quanto nella maggioranza dei casi l'orientamento è stato portato a termine.

È importante però considerare che i parametri statistici valutati in fase di orientamento (ridondanza dei punti, ricoprimento dei fotogrammi, etc.) non sempre sono sufficienti a permettere una valutazione affidabile della qualità del blocco. Pertanto, concetto poco rivoluzionario per chi si occupa di geomatica, è importante, se non necessario, disporre di un dato di controllo per poter effettivamente verificare la rispondenza metrica dei risultati. Al tempo stesso, quando si dispone di parametri di calibrazione noti e accurati (senza correlazioni fra i parametri) e si realizza una geometria di blocco consistente e sufficientemente rigida, non esistono, dalla sperimentazione effettuata, motivi di pregiudizio nei confronti degli approcci (più votati all'automazione) sviluppati in Computer Vision: i programmi

confrontati, quando queste condizioni erano verificate, raggiungevano tutti all'incirca gli stessi risultati.

In altre parole, sebbene questi strumenti di orientamento automatico siano ideati per consentire anche ad operatori inesperti un loro facile utilizzo, non sempre l'automazione è alleata dell'utente: la qualità della soluzione ottenuta dipende dalle caratteristiche del blocco e dalle impostazioni di processo scelte, piuttosto che dallo specifico codice di calcolo. Di conseguenza, qualora l'accuratezza del modello sia prioritaria, è importante che qualsiasi strumento sia adoperato con la necessaria competenza.

## BIBLIOGRAFIA

Arya, S., Mount, D. M., Netanyahu, N. S., Silverman, R., Wu, A. Y. (1998). An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching fixed dimensions. *Journal of the ACM (JACM)*, 45(6), 891-923.

Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up robust features. In *Computer Vision—ECCV 2006* (pp. 404-417). Springer Berlin Heidelberg.

Barazzetti, L., Scaioni, M. (2010). Dalle immagini dell'oggetto alla replica fisica in modalità automatica.

Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M. (2010). Extraction of accurate tie points for automated pose estimation of close-range blocks. In *ISPRS Technical Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis*.

Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M. (2010b). Automation in 3D reconstruction: results on different kinds of close-range blocks. In *ISPRS Commission V Symposium Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Newcastle upon Tyne, UK* (Vol. 38, No. 5).

Barazzetti, L., Scaioni, M., Remondino, F. (2010c). Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *The Photogrammetric Record*, 25(132), 356-381.

Barazzetti L., Roncella R., Forlani G., Remondino F., Scaioni M. (2011b). Orientamento automatico di blocchi fotogrammetrici in ambito close-range: stato dell'arte e prospettive della ricerca. *Atti Geomatica, le radici del futuro. Tributo a Sergio Dequal e Riccardo Galetto*, 10-11 Febbraio, Pavia.

Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395.

Förstner, W., Gülch, E. (1987). A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. In *Proc. ISPRS intercommission conference on fast processing of photogrammetric data* (pp. 281-305).

Fitzgibbon, A., & Zisserman, A. (1998). Automatic 3D model acquisition and generation of new images from video sequences. In *European Signal Processing Conference* (pp. 311-326).

Grün, A. (1984) Adaptive least squares correlation—concept and first results. *Intermediate Research Report to Heleva Associates, Ohio State University, Columbus, Ohio*, pp. 1-13.

- Gruen, A. W., Baltsavias, E. P. (1988). Geometrically constrained multiphoto matching. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(5), 633-641.
- Harris, C., Stephens, M. (1988). A combined corner and edge detector. In *Alvey vision conference* (Vol. 15, p. 50).
- Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110.
- Nistér, D. (2004). An efficient solution to the five-point relative pose problem. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 26(6), 756-770.
- Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., Remondino, F. (2011). Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation. In *Proc. CIPA*.
- Roncella, R., Re, C., Forlani, G. (2011). Comparison of two structure and motion strategies. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3816, 343-350.
- Re, C., Cremonese, G., Dall'Asta, E., Forlani, G., Naletto, G., Roncella, R. (2012). Performance evaluation of DTM area-based matching reconstruction of Moon and Mars. In *SPIE Remote Sensing* (pp. 85370V-85370V). International Society for Optics and Photonics.
- Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2006). Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 25(3), 835-846.
- Strecha, C., von Hansen, W., Van Gool, L., Fua, P., Thoennessen, U. (2008, June). On benchmarking camera calibration and multi-view stereo for high resolution imagery. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on* (pp. 1-8). IEEE.
- Torr, P. H. S. (2002). Bayesian model estimation and selection for epipolar geometry and generic manifold fitting. *International Journal of Computer Vision*, 50(1), 35-61.
- Pollefeys, M., Van Gool, L., Vergauwen, M., Verbiest, F., Cornelis, K., Tops, J., Koch, R. (2004). Visual modeling with a hand-held camera. *International Journal of Computer Vision*, 59(3), 207-232.