

*Filiberto Chiabrando

*Erik Costamagna

*Antonia Spanò

La correlazione di immagini per la generazione di modelli 3D per il patrimonio costruito

Parole chiave: sensori passivi, correlazione di immagini, modelli digitali 3D, beni architettonici, Photomodeler Scanner (Eos System), MicMac (IGN, France).

Abstract I modelli dettagliati 3D derivati dalle tecniche di rilievo metrico digitale vengono impiegati con crescente sviluppo in moltissimi campi applicativi, dal rilievo del territorio e delle aree urbane, per i quali sono stati testati e messi a punto processi di elaborazione di dati satellitari o aerei, ai beni paesaggistici strettamente correlati al territorio fino alla sfera dei Beni Culturali. L'elevato dettaglio ottenibile delle superfici e la loro accuratezza li rende particolarmente stimati per un largo insieme di finalizzazioni.

Questo contributo esamina in particolare i cosiddetti sensori passivi e i relativi sistemi di correlazione d'immagine, poiché l'efficacia dei modelli ottenibili, il basso costo e la ricchezza d'informazione offerta, rendono questi modelli di importanza strategica nei settori caratterizzati da scarse risorse come quello dei Beni Culturali.

Dopo una breve rassegna dei metodi disponibili, è riportato un esame dell'applicazione degli algoritmi di base implementati in due diffusi *software*; a corredo alcune valutazioni circa le strategie di *matching* in riferimento alle geometrie di acquisizione, alle tipologie di materiali e finiture superficiali degli oggetti rilevati. Una sezione sperimentale finale descrive alcuni *test* ed una loro lettura critica per la comparazione di differenti soluzioni da riferire a diversi casi studio.

IL RUOLO DEI MODELLI 3D NELLA DOCUMENTAZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE

La richiesta di rilievo digitale e creazione di modelli tridimensionali dettagliati è in rapidissima crescita per tutte le tipologie di Beni Culturali (BBCC). Analogamente ad altri settori di ricerca o campi applicativi (meccanica, robotica, ricostruzione modelli umani) le caratteristiche che li rendono particolarmente interessanti sono il grado di dettaglio, anche molto elevato, e la loro accuratezza. Nei BBCC, particolarmente in quelli architettonici, la possibilità di realizzare parti di modello con gradi di dettaglio e risoluzioni diverse, a seconda dell'attenzione richiesta sulle singole porzioni, è molto spesso particolarmente proficua e stimata. E' necessario considerare che i modelli 3D derivati dalle tecniche innovative del rilievo digitale costituiscono sostanzialmente uno strumento nuovo, e non certo un fatto nuovo in sé. La riflessione realizzata nell'ambito della rappresentazione d'Architettura dopo la rivoluzione digitale dell'informazione, è stata attenta a riassegnare alla rappresentazione mediante modelli continui 3D, ruoli già consapevolmente legati alle finalità di contenuto dei modelli tradizionali. Questi modelli (proiezioni ortogonali organizzate in piante, prospetti e sezioni, modelli 3D dalla geometria schematizzata e generati da entità geometriche piane, da superfici dalla semplice geometria di traslazione o rotazione, superfici cioè di equazione nota) possono essere *texturizzati* mediante immagini

controllate per via fotogrammetrica. La specificità che li distingue da quelli trattati in questo contributo è la loro generazione totalmente manuale, oltre alla minore accuratezza e fedeltà.

È opinione comune che la modellazione 3D derivante dai sistemi di rilievo digitale, tramite sensori attivi e passivi, offra maggiori rapidità e ricchezza di dettaglio rapportata ad altri sistemi; essa quindi consente di ottenere una documentazione di forma e caratterizzazioni morfologiche e tematiche che risulta più **sostenibile**, in termini principalmente di costi e di densità di informazione disponibile, di quella derivata da altri sistemi. La facoltà di estrarre sia rappresentazioni bidimensionali su piani sezione con assetto spaziale intenzionalmente mirato a zone sensibili della fabbrica e al contempo liberamente prescelto, sia rappresentazioni 3D di diverso tipo e mirate ad evidenziare fenomeni diversi (*wireframe*, *shaded*, modelli di elevazione) rende tali metodi più versatili e produttivi, quindi più efficaci nel quadro generale di scarsità di risorse che domina la sfera dei Beni Culturali.

I processi di conservazione del patrimonio si sono ormai attestati su programmi altamente specializzati e l'ampiezza del patrimonio pone la questione del **preservare** in modo più che urgente, man mano che cresce la consapevolezza che lo sviluppo della comunità umana e le sue interazioni con l'ambiente e i beni pongono questi ultimi in condizioni di rischio sempre più pressanti. La generazione dei modelli 3D, anche nella loro capacità di poter differire nel tempo la loro gestione e approfondimento (se inquadrati nei generali principi del rilievo metrico architettonico), sono anche legati allo sviluppo dei sistemi di archiviazione dei beni culturali, consultabili via *web*. Questi sono progettati e realizzati per la valorizzazione dei beni, legata alla condivisione delle informazioni tra specialisti ed alla divulgazione del loro valore al grande pubblico. La coordinazione di questi due settori di ricerca, la produzione di modelli accurati ed al momento riconosciuti versatili per ampi utilizzi, e la gestione dell'informazione spaziale tramite sistemi informativi, è una delle tematiche sotto stretta osservazione da parte della comunità scientifica che si occupa di documentare i beni.¹ Prima di presentare metodi ed esperienze è ancora opportuno sottolineare che la produzione dei modelli di superficie, che presenta fasi semiautomatiche di lavorazione, può produrre immagini dalla deformazione prospettica annullata, le ortofoto, in modalità automatica. La modellazione vera e propria, invece, prevede tempi di lavorazione, intervento critico e interpretazione della forma da parte dell'operatore umano molto rilevanti, che garantiscono che il rilievo non produca un calco della realtà, ma un modello in scala che rappresenti ed evidenzi forme e fenomeni che interessano l'oggetto di studio.²

I SENSORI PASSIVI E ATTIVI NEL RILIEVO DIGITALE

Gli strumenti che consentono di acquisire modelli di superficie tridimensionali e fotorealistici possono essere classificati, a seconda della tipologia di sensore di cui sono dotati, attivi o passivi. Alla prima categoria appartengono i sistemi *laser* terrestri (Terrestrial Laser Systems, TLS), le camere a tempo di volo (Time of Flight, ToF) o le camere 3D (Kahlman *et al.*, 2008; Rapp, 2007; Vosselman *et al.*, 2010), mentre le tecniche della fotogrammetria digitale fanno parte del secondo insieme. I sistemi *laser* terrestri sono al giorno d'oggi sempre più diffusi e il loro utilizzo nell'ambito del rilievo architettonico ed archeologico è sempre più frequente. L'inconveniente più grande di questa tipologia di strumenti è il loro costo ancora abbastanza elevato così come il loro peso che spesso li rende poco maneggevoli. Inoltre essi sono molto specializzati per determinate tipologie di rilievo e non consentono spesso di

¹ A questo proposito si può affermare che linee guida e protocolli proposti o in fase di ulteriore affinamento ed emanazione da parte di settori specifici che si occupano della conservazione dei beni, prevedono i requisiti evidenziati per il rilievo e i conseguenti archivi di informazioni. Un esempio è: AA. VV., *An addendum to the metric survey specifications for English Heritage – The collection and archiving of point cloud obtained by terrestrial laser scanning or other method*. url: www.english-heritage.org.uk

² Molti dei temi toccati interessano una bibliografia ampissima, verificabile negli interessi di ricerca ed argomenti di congressi di istituzioni internazionali come l'ICOMOS (International Council on Monuments and Sites), il CIPA (International Committee for Architectural Photogrammetry), l'ISPRS (International Society of Photogrammetry and Remote Sensing).

soddisfare diverse esigenze legate alla precisione o alla distanza di acquisizione presenti nel rilievo dello stesso sito o edificio. Per ridurre i costi ed aumentare la versatilità sono stati introdotti nuovi sistemi di acquisizione basati sui sensori attivi come le camere ToF o quelle 3D in grado di acquisire immagini di profondità (Chiabrando *et al.*, 2009). Sfortunatamente questi strumenti non consentono ancora di ottenere una risoluzione adeguata alle esigenze di documentazione e inoltre sono legati a specifiche condizioni di presa che non permettono un loro utilizzo diffuso nei contesti consueti di rilievo architettonico ed archeologico. Immagini a colori a bassa risoluzione sono acquisite dalle camere integrate nei TLS ed utilizzate per la *texturizzazione* del modello, mentre solo immagini in bianco e nero possono essere acquisite per mezzo delle camere ToF.

La necessità di ottenere delle informazioni più dettagliate sulle caratteristiche radiometriche degli oggetti e di superare le limitazioni degli strumenti precedentemente descritti ha portato ad una grande diffusione dei sistemi basati su sensori ottici passivi nel rilievo dei Beni Culturali. Gli sviluppi della fotogrammetria digitale orientati alla capacità di generare automaticamente modelli di superficie degli oggetti sono strettamente connessi con quelli della *computer vision* e allo sviluppo di algoritmi che permettono di trasformare immagini bidimensionali in modelli tridimensionali. Le regole della geometria proiettiva consentono di ottenere modelli 3D a partire da almeno due immagini di cui siano note le condizioni di presa.

METODI PER LA CORRELAZIONE DI IMMAGINI

La possibilità di derivare informazioni 3D da immagini è principalmente legata alla facoltà di identificare punti coniugati in immagini che riprendono lo stesso oggetto da centri di presa diversi. Tale operazione è sempre stata realizzata manualmente nella Fotogrammetria analogica e analitica e solo con l'avvento della Fotogrammetria digitale sono emersi con forza i motivi e i vantaggi di realizzarla in modalità semi-automatica ed automatica. Le prime proposte di realizzazione del cosiddetto processo di correlazione di immagini, cioè ricerca automatica di punti corrispondenti in coppie di immagini sono della fine degli anni '70 (Helava, 1978), ma solo nel decennio successivo matura nella comunità scientifica il proposito di risolvere gli orientamenti fotogrammetrici in modo automatico. Questa metodologia è stata inizialmente sviluppata per il telerilevamento; dapprima venne quindi utilizzata per estrarre modelli di superficie (DTM/DSM, Digital Terrain Model / Digital Surface Model) a partire da immagini satellitari o aeree e solo recentemente è stata applicata anche al rilievo dei vicini in campo architettonico ed archeologico. E' opinione diffusa tra coloro che utilizzano questi metodi, che la ricerca di Tie Points (TPs) nei tradizionali blocchi fotogrammetrici sia più semplice da realizzare di quella nei blocchi terrestri, più complessi per la maggiore variabilità della geometria e radiometria; per chiarirne le ragioni è allora opportuna una breve presentazione dei metodi disponibili.

I tre fondamentali metodi di correlazione si distinguono per l'entità impiegata per la ricerca delle corrispondenze tra punti. Il metodo *area-based matching* (ABM), basato sul confronto dei livelli di grigio di piccole aree corrispondenti nelle diverse immagini è particolarmente diffuso in Fotogrammetria. Se la qualità della similarità risultante tra i *pixel* non è misurata per semplice correlazione ma tramite un metodo ai minimi quadrati, il metodo è denominato *least square matching* (Grun, 1985; Baltsavias, 1991) che consente di introdurre vincoli ulteriori nella ricerca. Il secondo metodo è il cosiddetto *feature-based matching*, che utilizza punti, linee o aree omogenee da ricercare in immagini omologhe (se gli oggetti di ricerca sono costituiti da bordi, è detto *edge matching*) (Marr, Hildreth, 1980; Torre Poggio, 1980) ed in ultimo il *relational-matching* impiega più tipi di entità connesse tra loro per ricercarne i corrispondenti in immagini diverse; la relazione tra le entità che costituiscono le strutture di ricerca possono essere di tipo spaziale, topologico o radiometrico (Vosselman, 1992).

Questi metodi costituiscono essenzialmente delle strategie di *matching* e sono stati studiati e testati numerosissimi algoritmi che consentono di risolvere diversamente i problemi d'applicazione che in linea generale consistono nella soluzione dell'ambiguità di ricerca di oggetti corrispondenti e nella restrizione del campo di ricerca dei punti omologhi che riduce la complessità di calcolo. Per esempio nell'*area-based matching* i due *patch* omologhi di *pixel* da ricercare nei fotogrammi successivi non assumono le stesse caratteristiche e posizione nelle diverse immagini a causa delle diverse geometrie di presa, della diversa radiometria delle immagini, e della diversa quota dei punti appartenenti alle superfici fotografate. L'ambiguità invece è molto spesso esaltata da *texture* molto ripetitive presenti sull'oggetto. Una delle strategie più impiegate per ridurre lo spazio di ricerca è la geometria epipolare, secondo la quale i piani epipolari contengono punti coniugati che a loro volta appartengono a linee epipolari. Nelle immagini normalizzate, trasformate cioè in modo che le linee epipolari risultino parallele ai lati dell'immagine, la ricerca dei punti omologhi può avvenire lungo le linee anziché sul piano (Krauss, 1993) (cfr. pag. 59). Un approccio diverso ed anche complementare è quello che pone dei vincoli nella variazione di quota del punto cercato, ed ancora l'approccio gerarchico vincola la ricerca impiegando immagini successive di risoluzione gradualmente maggiore (Borgefors, 1988).

Il *feature-matching* (FM) è basato sulla preliminare estrazione delle *feature* e sul loro confronto operato sulle immagini successive, basato sulla somiglianza radiometrica e la disambiguità tra coppie di *feature* riconosciute corrispondenti. La ricerca delle *feature* avviene tramite gli operatori di interesse, es. Harris e Förstner (Harris, Stephe, 1999; Förstner, 1986), che lavorano su elementi puntuali o gli *edge detector*; tra i moltissimi messi a punto si annoverano quelli di Sobel, Roberts, Laplacian, Canny operator (cfr. pag. 61). È importante notare che soprattutto nel campo della generazione di superfici complesse e riprese da vicino, che comprende le esperienze sui BBCC, sempre più sembrano vantaggiose le strategie che integrano metodi di *matching*, ABM e FB (Remondino, Menna, 2008), oppure che integrano sistemi attivi e passivi. In linea generale l'applicazione integrata dei metodi ha come comune denominatore l'utilizzo di camere amatoriali calibrate *ad hoc* ed immagini acquisite senza dispositivi di controllo della geometria di presa, cioè *hand-handed*. Ovviamente tali strategie tendono ad ottimizzare i risultati nelle applicazioni a bassissimo costo, idonee per la sfera dei Beni Culturali.

L'Area-Based matching in Photomodeler Scanner (Eos System)

Le applicazioni *software* per la correlazione di immagini adottano prevalentemente algoritmi per la correlazione su coppie stereoscopiche di fotogrammi (Brown *et al.*, 2003). Questa tecnica utilizza solitamente immagini normalizzate per limitare la ricerca di corrispondenze unicamente lungo una direzione. Le immagini normalizzate sono ricampionate al fine di ricostruire l'assetto di presa normale e quindi contengono solo errori di parallasse orizzontale, permettendo la correlazione mono-dimensionale (Nex, 2010; Allen *et al.*, 2003). Per mezzo delle equazioni di collinearità vengono ricalcolate le coordinate immagine in un nuovo sistema di riferimento nel quale le stesse sono parallele al piano XY. Un metodo largamente usato è quello di utilizzare la geometria epipolare per ricampionare singoli punti sulle immagini.³ Secondo questo sistema di correlazione solo i fotogrammi inclinati permettono di determinare correttamente le coordinate dei punti epipolari, mentre le condizioni di presa normale non permettono di risolvere le equazioni. I raggi epipolari infatti nel caso della presa inclinata si intersecano nei punti epipolari mentre nel caso di quella normale essi sono paralleli. Questo sistema è largamente utilizzato anche dai *software* commerciali come Photomodeler Scanner della Eos Systems

³ Nella geometria epipolare gli epipoli sono costituiti dall'intersezione della congiungente i centri di presa con i piani immagine. I raggi epipolari sono invece la proiezione della congiungente il centro di presa con il punto di interesse di un fotogramma sull'altro. Il piano risultante dai raggi epipolari e dalla congiungente i centri di presa è detto piano epipolare. Tutti i raggi epipolari si intersecano negli epipoli che sono quindi la proiezione del centro di presa di un fotogramma sull'altro.

che è stato utilizzato per sperimentare gli algoritmi di correlazione basata sull'area su oggetti in ambito architettonico ed archeologico. Questi sistemi utilizzano sia prese normali che inclinate dato che entrambe contribuiscono differentemente al raggiungimento del risultato finale. Le prese inclinate, come abbiamo visto, sono necessarie nella fase di orientamento esterno per risolvere le equazioni di collinearità per mezzo della geometria epipolare. Al contrario la presa normale produce dei risultati migliori nella fase di correlazione in quanto gli algoritmi basati sull'area analizzano le differenze di intensità di *pixel* e quindi una geometria di presa simile permette una migliore ricerca delle corrispondenze.

La correlazione basata sull'area (ABM) fa ricorso ad algoritmi che misurano la corrispondenza tra i *pixel* sulla base dei livelli di intensità radiometrica. Le immagini sono convertite in livelli di grigio e conseguentemente vengono applicati algoritmi di ricerca che valutano il livello di corrispondenza, ovvero la similitudine dei livelli di grigio. Per ogni posizione x dei *pixel* nella prima immagine viene definito un dominio nella seconda immagine (rappresentato dall'area di ricerca) nel quale viene computato il livello di corrispondenza e quindi selezionato il *pixel* con la maggiore somiglianza (Babbar *et al.*, 2010).

Una serie di vincoli sono imposti al fine di controllare il processo di correlazione, vincoli dipendenti dal tipo di geometria e di materiale dell'oggetto rilevato. I più importanti sono la variazione di profondità, la dimensione dell'area di ricerca e il tipo di *texture*, cioè l'aspetto superficiale del materiale. Il primo parametro, la variazione di profondità, è geometrico e riguarda la differenza di elevazione rispetto alla superficie di riferimento. Questa superficie approssimata può essere ricavata per interpolazione dei punti di legame e di controllo oppure una nuova superficie può essere disegnata nel modello. Questa superficie di riferimento viene quindi utilizzata per misurare lo spettro di variazione dell'elevazione e limitare i risultati della correlazione ai valori che rientrano nell'intervallo. Lo spettro di questo intervallo può essere ampliato per ridurre il rumore della nuvola di punti estratta. Gli ultimi due parametri riguardano invece la correlazione stessa e dipendono dalle caratteristiche superficiali del materiale. Il secondo definisce il raggio dell'area di ricerca nelle immagini normalizzate. Maggiore è il grado di dispersione dei motivi, maggiore deve essere il raggio di correlazione per la ricerca di corrispondenze, mentre nel caso di *texture* ripetitive questo parametro può essere abbassato. Il terzo, strettamente relazionato con il precedente, permette di aumentare o diminuire il livello di tolleranza nella ricerca di corrispondenze. Sostanzialmente esso definisce il grado di ripetitività del motivo della *texture* e deve essere definito in accordo con il precedente.

Feature-based matching in MicMac (IGN France)

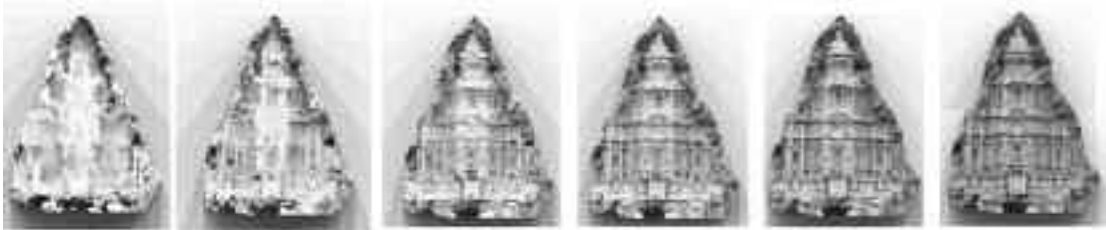
Il programma MicMac, appartenente alla categoria dei *software* in grado di eseguire il *matching* denso, è stato sviluppato dal laboratorio MATIS, struttura di ricerca appartenente all'Istituto geografico nazionale francese (IGN). Dal 2007, in continuo sviluppo e aggiornamento, il programma è *open source*, di conseguenza utilizzabile e "personalizzabile" da tutti gli utenti interessati. Attualmente le caratteristiche di estrema flessibilità del *software* consentono l'estrazione di nuvole di punti tridimensionali sia da immagini satellitari o aeree sia da immagini terrestri.

Nel panorama del *software open source* in grado di estrarre informazioni da serie di immagini, e rispetto a programmi sviluppati dalla comunità che si occupa di Computer Vision quali Bundler-PMVS (Furukawa e Ponce, 2010) e Samantha (Gherardi *et al.*, 2011), MicMac è l'unico che utilizza metodologie fotogrammetriche rigorose per il calcolo dei parametri di orientamento esterno e che, oltre a tenere in considerazione i parametri di orientamento interno delle ottiche utilizzate, è in grado di impiegare i modelli di calibrazione tipici della Fotogrammetria digitale e di eseguire l'autocalibrazione.

Nello specifico MicMac lavora seguendo i seguenti passaggi: estrazione automatica di punti di legame, esecuzione dell'autocalibrazione (ove necessaria) e triangolazione fotogrammetrica, realizzazione del *matching* denso ed infine produzione delle ortofoto.

profondità è esplorato. Nei passaggi successivi l'area da esplorare è ricavata dal passaggio precedente (per ogni ipotetico punto 3D) ed è calcolato il risultato della correlazione.

Figura 2 Approccio multi-risoluzione dell'algoritmo di *matching* denso di MicMac, applicato ad un bene culturale (tabernacolo ligneo, XVII sec. Piemonte)



Per ogni salto di scala il risultato della correlazione verrà proiettato nelle immagini vicine ed infine verrà ricavato un valore finale utilizzando una funzione di verosimiglianza globale. Grazie ad un approccio basato sulla minimizzazione dell'energia simile all'algoritmo di *semi global matching* (Hirschmuller, 2008), il processo consentirà anche di minimizzare gli *outlier* e limitare al massimo il rumore sulla nuvola di punti estratta.

Diversi parametri possono essere impostati nel *software* per ogni *step* del processo: l'algoritmo di ottimizzazione, i parametri di regolarizzazione della nuvola di punti, la porzione di immagine da analizzare, i metodi di filtraggio, la dimensione della finestra di correlazione, etc.

Al termine del calcolo il risultato del *matching* denso si presenta sotto forma di immagine di profondità; la nuvola di punti 3D è derivata estraendo dall'immagine di profondità la quota per ogni singolo punto mentre il tono radiometrico viene ricavato dalle immagini orientate. L'ultimo prodotto realizzabile con l'utilizzo di MicMac è l'ortofoto che, alla luce della ridondanza di informazioni 3D disponibili, è realizzata con una semplice ortoproiezione delle immagini precedentemente orientate. Il programma fornisce sia le singole ortoimmagini sia il mosaico.

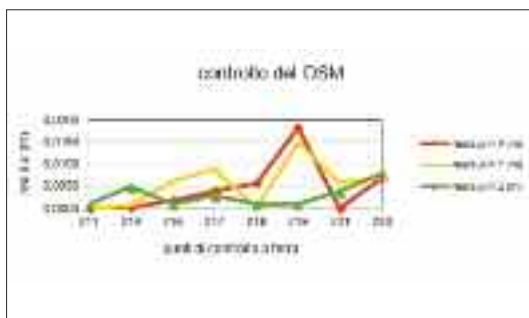
ESPERIENZE

Test di Area-Based matching in contesto archeologico

Le elaborazioni presentate riguardano il sito di via Gemina ad Aquileia (Udine, Italia). I fotogrammi sono stati acquisiti per mezzo di un palo telescopico (Chiabrando *et al.*, 2010), ad una distanza di presa di circa 6 metri con una dimensione del *pixel* a terra di circa 2 mm. Il primo insieme di fotogrammi riguarda una porzione di strada romana composta da grossi blocchi di basalto larga circa 10 m per una lunghezza complessiva di circa 40 metri. Il secondo insieme riguarda invece alcuni ambienti di una *domus* romana tardo imperiale conservata nelle strutture di fondazione dei muri divisorii e perimetrali e nei piani pavimentati. Il rilievo delle evidenze archeologiche per mezzo dell'acquisizione di fotogrammi nadirali è un'applicazione ad una scala più elevata delle tecniche in uso nella fotogrammetria aerea. Questa tipologia di oggetti infatti, grazie alla presenza di differenze di elevazione ridotte e la quasi assenza di superfici verticali, è facilmente rappresentabile per mezzo di rappresentazioni 2.5D come i *raster* Digital Elevation Models (DEM) o i modelli di forma. Le premesse riguardanti la geometria epipolare prevedono delle precise condizioni di presa che riguardano essenzialmente il rapporto tra base e altezza e l'angolo tra gli assi ottici principali. I valori di riferimento assunti per questi parametri sono un rapporto base/altezza compreso tra 0,2 e 0,5 e un angolo massimo tra gli assi ottici di 30°.

Figura 3 Primo *dataset*, schema della geometria di presa

Il primo insieme riguardante la strada è composto da una strisciata di fotogrammi nadirali acquisiti lungo la direzione della strada. Sono state quindi acquisite dalle stesse posizioni di presa anche fotogrammi inclinati lungo la stessa direzione (Figura 3). In quest'area sono state acquisite circa 30 immagini delle quali 1/3 nadirali e le rimanenti oblique. Il modello di superficie estratto ha un passo di 0,01m (raggio di correlazione 24 mm). I residui risultanti dalla verifica a campione su punti di controllo tra il modello di superficie generato e le misure topografiche (Tabella 1, Figura 4) sono compatibili con la tolleranza prevista per questo genere di rappresentazioni alla scala di 1:50.

Tabella 1 Primo *dataset*, residui sui punti di controllo del modello di superficie estratto (Digital surface Model)**Figura 4** Primo *dataset*, distribuzione dei punti di controllo

Il secondo insieme di fotogrammi, riguardante la *domus*, a differenza del precedente è composto da due strisciate parallele di fotogrammi nadirali e inclinati. L'integrazione delle due strisciate parallele di fotogrammi inclinati convergenti contribuisce alla buona soluzione dell'orientamento esterno e costituisce la geometria di presa ottimale per il rilievo di questa tipologia di manufatti (Figure 5 e 6). Le prese inclinate contribuiscono inoltre alla restituzione delle superfici verticali presenti.

Figura 5 Secondo *dataset*, schema della geometria di presa

I manufatti archeologici, d'altro canto, presentano superfici caratterizzate da un'elevata irregolarità della geometria e dell'aspetto del materiale. Questa tipologia richiede quindi solitamente dei tempi più lunghi di elaborazione nella fase di correlazione ed estrazione del modello di superficie essendo necessario aumentare il raggio di ricerca delle corrispondenze.

La Figura 6 e la Tabella 2 mostrano la distribuzione e i residui della verifica del modello sui punti di controllo misurati. I risultati sono anche in questo caso compatibili con le esigenze di documentazione e la scala di rappresentazione.

Figura 6 Secondo dataset, distribuzione dei punti di controllo utilizzati per la verifica

Tabella 2 Secondo dataset, residui sui punti di controllo del modello di superficie generato



Figura 7 Secondo dataset, vista prospettica del modello estratto



Test di Area-Based matching in contesto architettonico

Le caratteristiche geometriche dei manufatti architettonici, diversamente da quelli archeologici, sono rappresentabili solo per mezzo di superfici 3D, essendo composti in larga misura da piani verticali. Questa caratteristica impone innanzitutto una diversa geometria di presa composta da fotogrammi verticali convergenti che, nel caso del rilievo di interi edifici, seguono solitamente uno schema ad anello anziché quello delle strisciate in uso nella fotogrammetria aerea. Il caso studio presentato riguarda un piccolo edificio a pianta ottagonale caratterizzato da un ingresso porticato, una serie di

aperture e dei volumi secondari aggregati al principale.⁴ Le superfici murarie sono tutte intonacate. Due set di fotogrammi sono stati acquisiti: un primo anello composto da un fotogramma parallelo alla facciata e uno inclinato in corrispondenza dello spigolo, un secondo anello composto da una coppia parallela per ogni facciata (Figure 8 e 9).

Figura 8 Primo schema di presa



Figura 9 Secondo schema di presa



Le caratteristiche superficiali del materiale dell'oggetto rilevato assumono un'importanza notevole nella correlazione basata sull'area essendo questa dipendente dai livelli di intensità radiometrica dei *pixel*. Superfici che presentino dei motivi regolari o che non definiscono l'aspetto del materiale permettono una più facile ricerca delle corrispondenze. Nel caso di superfici come il marmo o l'intonaco, caratterizzate da un livello di intensità radiometrica uniforme, la ricerca di corrispondenze è particolarmente difficile. Per ovviare al problema è stato necessario aumentare notevolmente il raggio di ricerca e i parametri di tolleranza, conseguentemente i tempi di elaborazione e in maniera limitata il livello di rumore. Le Figure 10 e 11 mostrano che il livello di rumore si riduce utilizzando solo le coppie parallele alle facciate.

Figura 10 Livello di rumore nella correlazione con i fotogrammi inclinati



Figura 11 Livello di rumore nella correlazione con la coppia parallela



Figura 12 Vista del modello estratto



Esperienze di feature-based matching in contesto archeologico

Le aree analizzate sono quelle venute alla luce nell'area di Via Gemina ad Aquileia (Udine, Italia) e già riportate nel paragrafo a pag. 59 che descrive i test eseguiti con Photomodeler Scanner. Come pre-

⁴ Questa esperienza, rivista in occasione del presente resoconto, è stata oggetto della tesi di laurea di Elena Cerutti (E. Cerutti, *Archivio fotografico georiferito, rilievo e modellazione metrici 3D. Proposta di metodo applicata al Sacro Monte di Belmonte*, rel. A. Spanò, J.M. Tulliani, 2012)

vedibile, si sono riscontrati alcuni problemi nella fase di estrazione dei TP sulla area del cardo, a causa della presenza della ghiaia nella parte centrale della strada che, date le sue caratteristiche di estrema omogeneità e ripetitività della superficie, ha provocato una limitata ed errata identificazione dei punti di legame (Figura 13).

Figura 13 Due esempi di estrazione non corretta dei punti di legame



Figura 14 Immagini orientate sull'area del cardo



Figura 15 Immagine di profondità della prima parte del cardo (sinistra), rumore riscontrato in prossimità della mezzeria (nel rettangolo a destra)



Tale problema è facilmente risolvibile con operazioni di *editing* manuale che prevedono la cancellazione dei punti non correttamente estratti. Una volta eliminati tali punti, sull'area del cardo, è stata realizzata la triangolazione aerea grazie all'utilizzo di alcuni Ground Control Points appositamente materializzati (con l'utilizzo di mire) e misurati sulla superficie dell'oggetto con metodi topografici. Nella Figura 14 è riportato il blocco fotogrammetrico orientato.

Orientati i fotogrammi si è proceduto con il processo di *matching* denso (Figura 15 sinistra) che ha consentito di ottenere ottimi risultati sulla prima parte dell'antica strada. Meno corretta è invece risultata l'immagine stessa in prossimità della mezzeria, nella quale sono stati riscontrati alcuni errori nella generazione delle informazioni tridimensionali (elevato rumore, Figura 15 destra); tale aspetto è principalmente imputabile alle caratteristiche dell'oggetto ripreso (ghiaia uniforme presente nell'area). Nonostante tali problemi la nuvola di punti generata (in parte editata per eliminare l'eccessivo rumore), ha consentito la realizzazione di una completa e corretta ortofoto dell'intero oggetto (Figura 16). Nel caso della porzione di *domus* analizzata, essendo le superfici riprese caratterizzate da pavi-

Figura 16 Mosaico delle 19 ortofoto realizzate



mentazioni in mosaico e di conseguenza con contrasti netti e ben distinguibili, è stato possibile estrarre un numero ridondante di punti senza incorrere in errori dovuti al non corretto funzionamento dell'algoritmo di correlazione. La fase successiva ha riguardato la triangolazione aerea che in questo caso è stata eseguita utilizzando le coordinate dei centri di presa, precedentemente calcolate in un tradizionale *software* di fotogrammetria digitale. I risultati ottenuti (residui inferiori ai 2 *pixel*) hanno confermato la buona riuscita del processo di triangolazione sull'area oggetto della sperimentazione.

Figura 17 Porzione dell'immagine di profondità della *domus* (sinistra), nuvola di punti colorata (destra)



Successivamente è stato eseguito il processo di *matching* denso ed infine è stata generata la nuvola di punti 3D colorata sull'area della *domus*. Nella Figura 17 è riportata una porzione dell'immagine di profondità e la relativa nuvola di punti, con passo tra i punti pari a circa 3 mm. Alla luce degli eccellenti risultati ottenuti il *test* è proseguito con la realizzazione di un modello 3D triangolato (Figura 18) grazie al quale è stato possibile ottenere una completa documentazione sulla forma reale dell'oggetto. Infine utilizzando le informazioni radiometriche derivanti dalla nuvola di punti è stato realizzato anche un modello 3D *texturizzato* (Figura 19).

Figura 18 Modello 3D dell'area oggetto del rilievo



Figura 19 Vista del modello *texturizzato*



Esperienze di feature-based matching in contesto architettonico

Una successiva applicazione è stata sviluppata su un ex edificio industriale oggi in fase di studio per la realizzazione di un progetto di rifunzionalizzazione. L'edificio risalente agli inizi del '900 è un silo per lo stoccaggio del Klinker, costituito da una membrana sottile in cemento armato di forma paraboloidale. Sull'area sono stati eseguiti una serie di rilievi sia con metodologia Laser Scanner che fotogrammetrica, orientati alla definizione delle geometrie dell'edificio. Inoltre, grazie alle informazioni raccolte, sono stati realizzati anche una serie di *test* di utilizzo del programma MicMac.

Le tradizionali fasi del processo attraverso il quale MicMac è in grado di generare la nuvola di punti 3D sono state seguite nel caso del fronte esterno del fabbricato; l'unica differenza ha riguardato la

fase di triangolazione aerea, nella quale non sono stati utilizzati dei punti di controllo di coordinate note. L'intero processo di calcolo è stato eseguito, in relativo, utilizzando un'immagine di riferimento che comprendesse l'intero fronte per la realizzazione dell'orientamento esterno.

I risultati ottenuti sono soddisfacenti ed il blocco è stato correttamente orientato (Figura 20). Al termine del processo di *matching* invece sono stati riscontrati, soprattutto nella parte bassa dell'edificio, errori nella generazione dell'immagine di profondità; le ragioni possono essere imputate sia alla geometria di presa sia soprattutto alla forma dell'oggetto e all'omogeneità della superficie, che hanno causato i problemi riscontrabili nelle nuvole di punti generate (Figura 21).

Figura 20 Immagini orientate relative al fronte Est

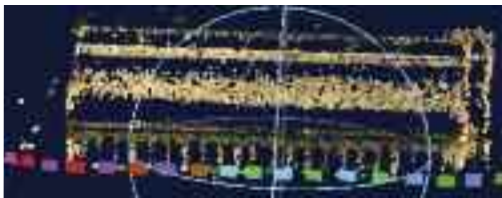


Figura 21 Nuvola di punti 3D (a destra e sinistra), nei rettangoli sono evidenziati i problemi



E' quindi prevista l'integrazione di immagini acquisite con l'utilizzo di piattaforme elevatrici e UAV che consentano di documentare con un maggior numero di immagini l'intera area e di conseguenza aumentare la ridondanza delle informazioni utili per la realizzazione del *matching*. Altri test sono stati eseguiti sull'intradosso della superficie voltata, limitatamente ad una piccola porzione del paraboloide che caratterizza l'intera copertura. È stata valutata la possibilità di estrarre la geometria dell'oggetto da una serie limitata di immagini. In questo caso sono state orientate otto immagini (Figura 22) utilizzando alcuni Ground Control Points (GCPs) misurati sull'intradosso del paraboloide. Successivamente è stato eseguito il processo di *matching* che ha permesso di estrarre la nuvola di punti 3D (Figura 23 destra) utile alla valutazione delle geometrie della copertura.

Figura 22 Immagini orientate nella parte interna



Figura 23 Immagine di profondità (sinistra), nuvola di punti generate (destra)



CONCLUSIONI

La ricerca dell'orientamento di un numero minimo e sufficiente di fotogrammi, che nelle applicazioni convenzionali di Fotogrammetria per il rilevamento degli oggetti era consueto, viene ribaltato nell'applicazione dei metodi di *matching*. Sebbene la geometria di presa, i rapporti tra basi di presa e distanze continuino ad essere altamente rilevanti, la ridondanza dei dati ottenibile con l'aumento del numero di fotogrammi orientati, e a seconda del metodo, l'uso combinato di fotogrammi nadirali e inclinati, è di importanza nodale per la buona qualità dei modelli derivabili dai sistemi di *matching* di immagini.

Per quanto riguarda i *software* commerciali ed *open source* attualmente disponibili (benché siano stati esaminati nel dettaglio solo due *software* appartenenti ciascuno ad una delle due categorie) si può dire che per oggetti dalla geometria molto semplice, buoni risultati nell'estrazione dei modelli siano facilmente raggiungibili, anche da non esperti, impiegando funzioni *standard* dei *software*. Se invece gli oggetti d'interesse presentano forme complesse, o ancor più materiali o finiture poco adatte alle modalità con il quale l'algoritmo produce il *matching*, le conoscenze per ovviare ai problemi ed ottenere risultati soddisfacenti devono essere senz'altro più approfondite.

Questi sistemi sono senz'altro più che promettenti e per questo in via di continua affermazione e diffusione. Dopo l'estensione dalle applicazioni territoriali a quelle degli oggetti piccoli e vicini in special modo la comunità dedita all'attenzione ed alla conservazione dei beni culturali ottiene, dai sistemi di ricostruzione delle superfici da sensori passivi, grandi vantaggi dovuti al basso costo, alla possibilità di uso in situazioni di emergenza, alla rapidità di acquisizione dei dati. Il punto nodale che ne decreta il favore è la possibilità di ottenere prodotti versatili, da cui estrarre rappresentazioni tradizionali oppure rappresentazioni tridimensionali di elevato dettaglio, precisione e accordo di contenuto metrico e radiometrico.

Bibliografia e sitografia

- Allen, P. K., Troccoli, A., Smith, B., Murray, S., Stamos, I., Leordeanu, M.; (2003), *New methods for digital modelling of historic sites*. IEEE Computer Graphics and Applications, 23(6), pp. 32–41.
- Babbar, G., Bajaj, P., Chawla, A. & Gogna, M., (2010), *Comparative Study Of Image Matching Algorithms*, in International Journal of Information Technology and Knowledge Management, , Volume 2, No. 2, pp. 337-339.
- Baltsavias, E. P., (1991), *Geometrically constrained multiphoto matching*, Mitteilungen Nr. 49, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, Switzerland.
- Borgefors, G., (1988), *Hierarchical chamfer matching: a parametric edge matching algorithm*, IEEE Trans. PAMI, 10, 849–865.
- Brown, D.C.,(1971), *Close-range camera calibration*; PE&RS, Vol. 37(8), pp.855-866
- Brown, M., Burschka, D., Hager, G., (2003), *Advances in Computational Stereo*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25, NO.8.
- Chiabrando, F., Chiabrando, R., Piatti, D., Rinaudo, F., (2009), *Sensors for 3D imaging: metric evaluation and calibration of a CCD/CMOS time- of-flight camera*; Sensors, vol. 9, no. 12, pp. 10 080–10 096.
- Chiabrando, F., Costamagna, E., Spanò, A.T., Rinaudo F.,(2010), *Very close nadiral images: a proposal for quick digging survey*; in: ISPRS Archives, XXXVIII/5, pp. 155-160.
- Förstner, W., (1986), *A feature based correspondence algorithm for image matching*, Proceedings of the Symposium from Analytical to Digital. Rovaniemi, Finland, pp.150-166.
- Gherardi, R., Toldo, R., Garro, V. and Fusiello, A., (2011), *Automatic camera orientation and structure recovery with Samantha*, in ISPRS Archives, International Workshop 3D-ARCH, on CD-ROM, Trento, Italy.
- Grün, A., (1985), *Adaptive least square correlation: a powerful image matching technique*, South African Journal of PRS and Cartography, Vol. 14(3), pp. 175-187.
- Helava, U.V., (1978), *Digital correlation in photogrammetric instruments*, Photogrammetria, Vol. 34, pp. 19-41.
- Harris, C., Stephen, M., (1999), *A combined corner and edge detection*, In M. M. Matthews, editor, Proceedings of the 4th ALVEY vision conference, University of Manchester, England pp. 147–151.
- Hirschmuller, H.; (2008), *Stereo processing by Semi-Global Matching and Mutual Information*; IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(2), pp. 328–341.
- Kahlmann, T., Ingensand, H.;(2008), *Calibration and development for increased accuracy of 3D range imaging cameras*; J. Appl. Geodesy, vol. 2, no. 1, pp. 1–11.
- Kraus, K., (1993), *Photogrammetry*, Dümmler Verlag, Volume 1, Bonn, Germany.
- Lowe, D.G., (2004), *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*; International journal of computer vision, Volume 60, Number 2, pp 91-110.
- Marr, D., Hildreth, E., (1980), *Theory of edge detection*. Proc. R. Soc. London , 207 pp. 187–217.
- Nex, F., (2010), *Multi-Image Matching and LiDAR data new integration approach*. Ph.D. Thesis, Politecnico di Torino, Torino.
- Pierrot-Deselligny, M., Cléry, I., (2011), *APER0, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of a Set of Images*. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, Trento, Italy.
- Remondino, F., Fraser, C., (2006), *Digital camera calibration methods: considerations and comparisons*, in: ISPRS Archives 36(5), pp. 266-272. ISPRS Commission V Symposium, Dresden, Germany.
- Remondino, F., Menna, F., (2008), *Image-Based surface measurement for close-range heritage documentation*, in ISPRS Archive, Beijing, Vol. XXXVII, Part B5, pp. 199-206.
- Rapp, H., (2007), *Experimental and theoretical investigation of correlating ToF- camera systems*; Master's thesis, University of Heidelberg.
- Torre, V., Poggio, T.A., (1980), *On edge detection*. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., pp. 147–163.
- Vedaldi, A., (2010), <http://www.vlfeat.org/~vedaldi/code/siftpp.html>.
- Vosselman, G. (1992), *Relational matching*, LNCS, Springer.
- Vosselman, G., Maas, H.-G.; (2010), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*; Whittles Publishing, London (UK).