

## **Rilievo 3D di reperti archeologici con tecniche fotogrammetriche**

Mauro Lo Brutto, Maria Grazia Spera

Dipartimento di Rappresentazione, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo  
e-mail [lobrutto@unipa.it](mailto:lobrutto@unipa.it), [mariagraziaspera@hotmail.it](mailto:mariagraziaspera@hotmail.it)

### **Riassunto**

Il lavoro svolto ha affrontato le problematiche relative l'impiego di procedure automatiche di *image matching* per la realizzazione di modelli digitali tridimensionale di Beni Archeologici. La ricerca è stata svolta sperimentando soluzioni fotogrammetriche sia con classiche procedure stereoscopiche sia con approcci di tipo multi-immagine. Tali applicazioni consentono di raggiungere risultati paragonabili qualitativamente e metricamente a quelli ottenuti con tecniche laser scanner. L'oggetto test usato per le sperimentazioni è una piccola Arula del Tempio della Vittoria appartenente al sito archeologico di Imera.

### **Abstract**

The aim of this research is to study different image matching procedures for the realization of three-dimensional digital models of Archaeological Heritage. Stereoscopic and convergent images have been used to test different photogrammetric network. The research provide results comparable to those obtained by laser techniques. The object used for the tests is a small Arula of the Tempio della Vittoria preserved in the museum of archaeological site of Imera.

### **Introduzione**

La conservazione dei Beni Culturali attraverso la ricostruzione di modelli tridimensionali foto-realistici è oggi un ambito in continuo sviluppo ed evoluzione. Le motivazioni per cui tale tematica risulta di grande interesse sono tra le più svariate: la documentazione in caso di distruzione o danneggiamento, la creazione di musei e turismo virtuale, la didattica, gli studi strutturali, ecc.

Per modellazione tridimensionale si intende quel processo che parte dall'acquisizione del dato metrico e finisce con un modello virtuale in tre dimensioni visibile in modo interattivo su un computer. Nel corso degli anni gli approcci e le tecniche sperimentate a tal fine sono state numerose e possono essere suddivise in tecniche di tipo fotogrammetrico, tecniche che sfruttano strumenti laser e tecniche che si basano su sistemi a luce strutturata. In particolare, le tecniche fotogrammetriche e le tecniche laser sono state ampiamente utilizzate in numerose applicazioni per il rilievo dei Beni Culturali. Le esperienze che hanno messo a confronto i metodi fotogrammetrici con quelli laser portano a definire le modellazioni 3D ottenute con tecniche laser migliori sia dal punto di vista metrico che qualitativo; pertanto il prodotto della tecnica laser viene in genere usato come modello di verifica sul risultato ottenuto con tecniche fotogrammetriche (Bitelli et. al., 2007). Ammesso che le "condizioni a contorno" nella tecnica fotogrammetrica risultino le più precise ed affidabili possibili, si è però riscontrato che i risultati ottenuti con i due diversi approcci in molti casi sono simili tra loro (Remondino, 2007). E' possibile quindi affermare che un metodo viene valutato migliore dell'altro caso per caso e solo in funzione delle condizioni operative piuttosto che della qualità del prodotto.

La ricostruzione di modelli tridimensionali attraverso tecniche che sfruttano il principio della correlazione tra immagini nel campo della fotogrammetria terrestre si sta sempre più affermando

soprattutto nell'ambito della modellazione di reperti archeologici di piccole e medie dimensioni. L'estrazione di modelli 3D con un elevato grado di dettaglio tramite procedure di *image-matching* è infatti uno degli obiettivi di molte applicazioni fotogrammetriche. I risultati conseguiti in diverse sperimentazioni hanno però evidenziato alcuni problemi dovuti soprattutto alla presenza di “buchi” e di “rumore” nei modelli di superficie e alla difficoltà di proseguire con tecniche automatiche nel caso di oggetti con superfici troppo regolari. Per ottimizzare al massimo il lavoro e garantire un buon risultato occorre una elevata precisione nelle fasi preliminari (calibrazione della camera e orientamento dei fotogrammi), che l'oggetto in esame abbia superfici e forme particolari tali da rendere le relazioni tra punti uniche e che sui fotogrammi sia limitata l'area in cui il software deve sviluppare il processo di correlazione (Bitelli et al., 2007; Remondino & Menna, 2008).

Lo studio descritto nella presente ricerca è stato svolto nell'ambito delle attività condotte per la realizzazione di modelli 3D su reperti archeologici di piccole e medie dimensioni ottenibili da varie tecniche di rilievo fotogrammetrico. Esperienze precedenti avevano consentito di ottenere risultati incoraggianti in alcuni test condotti sulla metopa di Artemide e Atteone del tempio E di Selinunte utilizzando riprese fotogrammetriche con caratteristiche non ottimali per quanto riguarda la risoluzione e la scala delle immagini (D'Amelio & Lo Brutto, 2009). In questo lavoro vengono presentati i risultati conseguiti per il rilievo 3D dell'Arula del Tempio della Vittoria del sito archeologico di Imera, conservata presso l'omonimo museo archeologico. Con il termine Arula si definiscono tutte le piccole are con decorazione a rilievo sui lati. L'Arula oggetto di questo studio risale al 480 a.C. ed è di origine Greca. Le sue dimensioni sono circa 33 cm x 26 cm x 15 cm. Su uno dei lati presenta un bassorilievo che raffigura un vecchio alato in volo che trasporta il corpo esanime di un giovinetto; gli studiosi negli anni hanno identificato questa immagine con il mito di Dedalo e Icaro. Nel lavoro svolto sono state affrontate le problematiche relative l'impiego di procedure automatiche di *image matching* per l'estrazione del DSM del bassorilievo e per la ricostruzione del modello 3D fotorealistico dell'Arula. L'elaborazione dei dati è stata fatta usando software commerciali come PhotoModeler Scanner della EOS Systems, Image Master della Topcon e ZScan della Menci Software. Al termine del lavoro, i DSM del bassorilievo realizzati con i vari software fotogrammetrici sono stati confrontati con un DSM del bassorilievo ottenuto tramite rilievo con un laser scanner per effettuare delle valutazioni anche dal punto di vista metrico.

### Prese fotogrammetriche

Le operazioni di rilievo fotogrammetrico sono state realizzate in due differenti fasi. Nella prima fase sono state eseguite delle prese convergenti attorno all'Arula, nella seconda sono state effettuate delle prese stereoscopiche soltanto della parte del bassorilievo dell'Arula.

Le prese convergenti sono state realizzate con una camera digitale Canon EOS Mark II dotata di una focale da 50 mm; la distanza di presa è stata di circa 1 metro e sono state eseguite 24 prese convergenti più 4 prese dall'alto (Figura 1). Le prese stereoscopiche sono state effettuate con il sistema ZScan che prevede l'impiego di una camera digitale calibrata e una barra di precisione sulla quale fare scorrere la camera per eseguire tre immagini da basi di presa note (dove per base di presa si intende la distanza tra il primo e il terzo fotogramma). Il sistema utilizzato è dotato di una camera Nikon D80 con una focale da 28 mm; le prese sono state effettuate da una distanze di circa 0.85 m.

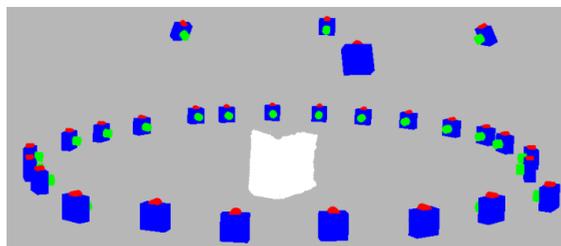


Figura 1 – Vista 3D dello schema delle prese convergenti.

### **Progetto prese convergenti: calibrazione della camera ed orientamento dei fotogrammi**

Il progetto di rilievo eseguito con le prese convergenti è stato elaborato con i software commerciali PhotoModeler Scanner e Image Master.

Le operazioni di calibrazione della camera sono state condotte adottando procedure standard previste nei software utilizzati che si basano sull'impiego di reticoli piani di calibrazione e schemi di presa prefissati. L'utilizzo del reticolo consente di eseguire l'operazione di calibrazione tramite l'individuazione in maniera totalmente automatica dei target e il successivo calcolo dei parametri di orientamento interno della camera cioè della distanza focale ( $c$ ), delle coordinate punto principale ( $x_p, y_p$ ), dei parametri di distorsione radiale ( $K_1, K_2, K_3$ ) e di distorsione tangenziale ( $P_1, P_2$ ).

In genere per la calibrazione della camera l'impiego di un reticolo piano non rappresenta la soluzione migliore, piuttosto dovrebbe essere più appropriato un reticolo 3D. Tuttavia, è possibile utilizzarlo quando le prese vengono realizzate anche con la camera ruotata di  $90^\circ$  e con un'accentuata convergenza (Remondino & Fraser, 2006).

Effettuando alcune prove di calibrazione si è riscontrato che lo schema di presa previsto per il software Image Master non prevede immagini ruotate di  $90^\circ$ ; inoltre, il software non permette nessun controllo sulla procedura in quanto non consente di scegliere quali parametri calcolare, non fornisce alcuna informazione sulle deviazioni standard e sul valore di correlazione dei parametri calcolati. Pertanto si è scelto di eseguire la fase di calibrazione solo con il software PhotoModeler Scanner. Per costatare l'influenza dei vari parametri di calibrazione nel processo di orientamento, sono state fatte diverse prove considerando i seguenti set di parametri:

1.  $c, x_p, y_p, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$ ;
2.  $c, x_p, y_p, K_1, K_2, K_3$ ;
3.  $c, x_p, y_p, K_1, K_2$ ;
4.  $c, x_p, y_p, K_1$ .

L'orientamento delle immagini è stato condotto in maniera semiautomatica grazie all'impiego di target circolari di diametro da 3 mm posizionati sull'Arula. La scala del modello fotogrammetrico è stata definita grazie all'impiego di due barre calibrate collocate sul fronte e sul retro dell'Arula. Le misure usate per la messa in scala hanno precisioni comprese tra  $50\div 60\mu\text{m}$ ; queste sono state poste come vincolo durante il calcolo di *bundle-adjustment*.

I differenti calcoli svolti nella fase di orientamento sia con Image Master sia con PhotoModeler Scanner in funzione dei diversi set di parametri di calibrazione della camera hanno evidenziato che si ottengono risultati migliori utilizzando soltanto la distanza focale ( $c$ ), le coordinate punto principale ( $x_p, y_p$ ) e i due parametri di distorsione radiale ( $K_1, K_2$ ). In pratica, nelle condizioni operative esaminate non è necessario considerare tutti i parametri di calibrazione teoricamente calcolabili.

Con entrambi i software considerati si è ottenuto uno s.q.m. di circa 0.1 pixel nelle coordinate dei punti immagine e uno s.q.m. di circa 0.1 mm nelle coordinate XYZ dei punti oggetto. È stata fatta, inoltre, una verifica sull'accuratezza utilizzando una delle due barre come vincolo al calcolo e l'altra come termine di confronto; anche in questo caso, i residui sulle misure delle barre calibrate sono risultate pari a 0.1 mm.

### **Progetto prese convergenti: generazione del DSM del bassorilievo e del modello 3D**

Il DSM del bassorilievo è stato calcolato imponendo un passo di 1 mm che è stato ritenuto adeguato per ottenere una superficie con un livello di dettaglio sufficientemente elevato in relazione alle dimensioni dell'Arula. Per ottimizzare il processo di correlazione sono state valutate le possibili coppie di immagini in relazione al rapporto base di presa/distanza e agli angoli di convergenza degli assi ottici delle camere. Con il software Image Master è stato sufficiente utilizzare la coppia di immagini più frontali caratterizzata da un rapporto base di presa/distanza pari a 0.30 e un angolo di convergenza di circa 14 gradi. La *mesh* ottenuta dal processo di correlazione è risultata priva di

“buchi” o “rumore”. Inoltre, sfruttando la possibilità di inserire delle *breakline* all’interno della zona da correlare è stato possibile restituire in maniera molto accurata anche le zone ad elevata curvatura. Con il software PhotoModeler Scanner è stato invece necessario utilizzare due coppie frontali di immagini; la prima analoga a quella utilizzata per ImageMaster, la seconda caratterizzata da un rapporto base di presa/distanza pari a 0.45 e un angolo di convergenza di circa 24 gradi. Sono state quindi generate due differenti *mesh* che successivamente sono state mosaicate. In tal modo è stato possibile eliminare la presenza di alcuni “buchi” in alcune zone un po’ più problematiche dal punto di vista della correlazione. In entrambi i casi una prima analisi di tipo qualitativo ha evidenziato che gli elaborati prodotti nel complesso rappresentano un DSM del bassorilievo molto fedele all’originale.

Successivamente al calcolo del DSM del bassorilievo si è proceduto alla produzione di un modello 3D completo utilizzando tutte le prese disponibili. Sia con ImageMaster che con PhotoModeler le immagini sono state suddivise in 27 coppie e il modello è stato creato in più porzioni che sono state successivamente mosaicate. Per evitare che il risultato finale fosse difficilmente gestibile nella fase di visualizzazione ed esplorazione è stato necessario impostare un passo di 3 mm. Tale passo è stato valutato come il giusto compromesso tra la fruibilità del modello e il livello di dettaglio richiesto in molte applicazioni. Dalle immagini sono state estratte le *textures* per ottenere dei modelli 3D foto-realistici (Figura 2). I modelli ottenuti con entrambi i software sono risultati molto soddisfacenti dal punto di vista qualitativo in quanto non presentano discontinuità, hanno superfici poco “rumorose” e omogenee dal punto di vista cromatico.



Figura 2 – Modello 3D realizzato con Image Master (a) e con PhotoModeler (b).

### Progetto prese stereoscopiche: sistema ZScan

Il sistema ZScan, oltre che dalla componente strumentale (camera, barra calibrata, treppiedi) è costituito anche da un programma sviluppato ad hoc per il calcolo in maniera totalmente automatica di DSM ad elevata risoluzione (un punto ogni 2÷3 pixel) dalle triplette stereoscopiche. I risultati ottenuti con questo sistema sono in genere molto soddisfacenti in termini di precisione e qualità del DSM, anche se su superfici particolarmente lavorate possono verificarsi delle discontinuità nel modello finale (Nex & Rinaudo, 2008).

Nel rilievo dell’Arula si è cercato di garantire una precisione teorica sul modello finale pari ad 1 mm e un passo della nuvola di punti inferiore ad 1 mm. Per la distanza di presa considerata (0.85 m) sono state valutate le basi di presa da 150 mm e 200 mm. Anche se dal punto di vista teorico la base maggiore dovrebbe consentire di ottenere risultati più precisi, si è riscontrato che con la base da 150 mm il DSM prodotto era equivalente dal punto di vista metrico a quello realizzato con una base da 200 mm, ma qualitativamente migliore per numero di punti correlati e continuità della superficie (Tabella 3). Pertanto tale modello è stato utilizzato per le verifiche successive.

| Dist. Presa<br>(m) | Base<br>(mm) | GSD<br>(mm) | Step<br>(pixel) | N. Pt<br>Correlati |
|--------------------|--------------|-------------|-----------------|--------------------|
| 0,85               | 150          | 0,165       | 2               | 879599             |

Tabella 3 – Parametri dell’elaborazione effettuata con il sistema Zscan.

Nel sistema ZScan la calibrazione della camera è predisposta con la messa a fuoco ad infinito, tale condizione implicherebbe l'utilizzo della camera soltanto con questa impostazione. Di fatto, però, nonostante si è cercato di variare opportunamente l'apertura del diaframma, con le distanze considerate le immagini si presentavano sfocate creando notevoli problemi nella fase di correlazione. E' stato quindi necessario modificare la messa a fuoco in funzione della distanza di presa. Tale modifica ha consentito la corretta esecuzione del processo di correlazione ma ha causato la generazione di un DSM non in scala. Questo problema è stato risolto inserendo dei punti d'appoggio nel progetto di ZScan e ricalcolando il DSM. Come punti di appoggio sono stati utilizzati alcuni punti calcolati nel progetto realizzato con PhotoModeler Scanner. Questa procedura ha consentito di ottenere un elaborato corretto dal punto di vista del fattore di scala e nello stesso sistema di riferimento degli elaborati realizzati nei progetti delle prese convergenti ma ha probabilmente influenzato la precisione raggiungibile sul modello.

Il DSM del bassorilievo è stato calcolato con una densità di punti pari a 0.3 mm, circa 3 volte maggiore della densità dei modelli di superficie precedentemente considerati. Il numero elevato di punti correlati, la lieve presenza di rumore e i buchi limitati soltanto alle zone non visibili sui fotogrammi hanno consentito di ottenere un prodotto molto vicino all'oggetto reale dal punto di vista qualitativo (Figura 4).



*Figura 4 – DSM del bassorilievo realizzato con il sistema ZScan.*

#### **Confronto fra DSM del bassorilievo fotogrammetrici e DSM del bassorilievo laser**

Una verifica metrica è stata condotta esclusivamente sui DSM del bassorilievo in quanto, per questa parte dell'Arula, si disponeva di una superficie ottenuta da una scansione laser con un laser scanner a triangolazione ottica Minolta Vivid 9i. La scansione è costituita da 26 “nuvole” di punti che presentano un'elevata percentuale di sovrapposizione. Tali scansioni sono state registrate e mosaiccate con il software PET e, considerata l'elevata ridondanza di punti, sono state ricampionate per ottenere una superficie con un passo di 0.5 mm.

I DSM del bassorilievo realizzati con Image Master, PhotoModeler Scanner e ZScan sono stati importati in Geomagic Studio 10 per effettuare il confronto con il modello di superficie ricavato dal laser scanner. Preventivamente è stata eseguita la registrazione tra le superfici fotogrammetriche e quella laser; successivamente sono stati calcolati i valori statistici più significativi (scostamenti massimi positivi e negativi, la media e la deviazione standard) delle differenze in altimetria (Tabella 5). Dai dati ottenuti si osserva che tutte le deviazioni standard risultano inferiori ad 1 mm; tuttavia nel caso del DSM ottenuto con ZScan si manifesta un peggioramento di tutti i parametri calcolati. In particolare la deviazione standard risulta essere quasi il doppio di quelle calcolate con Image Master e con PhotoModeler. Come evidenziato in precedenza, tale differenza potrebbe essere una conseguenza dell'utilizzo di punti d'appoggio ricavati da un precedente progetto fotogrammetrico. Per quanto riguarda gli scostamenti massimi positivi e negativi si presentano in tutti i casi valori elevati che però si trovano localizzati nelle zone di bordo.

|                     | Max positivo<br>(mm) | Max negativo<br>(mm) | Media<br>(mm) | Dev. Standard<br>(mm) |
|---------------------|----------------------|----------------------|---------------|-----------------------|
| DSM Laser-DSM PM    | 8,604                | -6,416               | 0,022         | 0,417                 |
| DSM Laser-DSM IM    | 6,269                | -15,915              | -0,024        | 0,500                 |
| DSM Laser-DSM Zscan | 13,295               | -15,895              | 0,081         | 0,990                 |

Tabella 5 – Parametri statistici delle differenze in altimetria.

### Conclusioni

Lo studio condotto rappresenta una verifica sperimentale delle potenzialità delle tecniche fotogrammetriche per l'estrazione di DSM e ricostruzione di modelli 3D attraverso diversi approcci metodologici e utilizzando differenti software commerciali.

I risultati conseguiti nel calcolo del DSM del bassorilievo sono molto vicini in termini di precisione a quelli ottenibili tramite rilievi 3D con strumentazione laser scanner. I valori di precisione del decimo di millimetro calcolati dal confronto con i dati laser rappresentano un buon risultato per rilievi fotogrammetrici di reperti archeologici di piccole e medie dimensioni e sono sicuramente accettabili per molte applicazioni nel campo della conservazione dei Beni Culturali. Inoltre, il modello 3D fotorealistico realizzato per l'intera Aula rappresenta un elaborato utilizzabile sia per scopi metrici che per indagini e studi qualitativi.

### Ringraziamenti

Si ringrazia l'Arch. Salvo D'Amelio per la collaborazione alle operazioni di acquisizione dati con il laser scanner e alle fasi di rilievo fotogrammetrico.

Ricerca svolta nell'ambito del progetto PRIN2008 dal titolo "ICT e Beni Culturali. Tecnologie Informative innovative e Sistemi Cognitivi per la rappresentazione 3D". Coordinatore nazionale: Prof.ssa Raffaella Brumana.

### Riferimenti bibliografici

Bitelli G., Girelli V., Remondino F., Vittuari L. (2007), "The potential of 3D techniques for Cultural Heritage object documentation", *Proc. of Videometrics IX - SPIE-IS&T Electronic Imaging*, Vol. 6491.

D'Amelio S., Lo Brutto M. (2009), "Analisi e comparazione di modelli di superficie di reperti archeologici realizzati tramite laser scanner e fotogrammetria", *Atti 13<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, 1-4 dicembre 2009, Bari*.

Menna F., Remondino F. (2008), "Image-based surface measurement for close-range heritage documentation", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII part B5-1 pp.199-206.

Nex F., Rinaudo F.(2008), "Multi-image matching: an "old and new" photogrammetric answer to lidar techniques", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII part B5 pp. 621-626.

Remondino F. (2007), "Detailed image-based 3D geometric reconstruction of heritage objects", *Trinational Conference of SGPBF, DGPF, OVG*, DGPF Tagungsband 16, pp. 483-492.

Remondino F., Fraser C. (2006), "Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI part 5 pp. 266-272.