

Analisi e comparazione di modelli di superficie di reperti archeologici realizzati tramite laser scanner e fotogrammetria

Salvatore D'Amelio (*), Mauro Lo Brutto (*)

(*) Dipartimento di Rappresentazione, Università di Palermo, Via Cavour 118, 90133 Palermo
e-mail salvatoredamelio@unipa.it, lobrutto@unipa.it

Riassunto

La ricerca svolta si è posta come obiettivo quello di verificare l'accuratezza di modelli di superficie (*Digital Surface Model* – DSM) di reperti archeologici realizzati attraverso procedure fotogrammetriche. La sperimentazione è stata condotta su alcuni reperti, già oggetto di studio in precedenti ricerche, conservati presso il museo Archeologico Regionale di Palermo. In questo lavoro vengono presentati i primi risultati relativi al rilievo della metopa di “Europa rapita dal Toro”. I DSM, generati con due differenti software di fotogrammetria, sono stati messi a confronto con il DSM ottenuto con un laser scanner a triangolazione ottica. Tale modello è stato considerato come riferimento per le verifiche effettuate. La comparazione ha permesso di effettuare una prima valutazione metrica.

Abstract

The aim of this research is to obtain the DSM (*Digital Surface Model*) of archaeological find by photogrammetric survey. The experimentation has been carried out on the metope of “Europa rapita dal Toro” preserved in the Archaeological Museum of Palermo. The DSM produced by two different photogrammetric software has been compared with the DSM obtained by a short range laser scanner. This DSM has been used as “true” reference surface. The comparison between the DSM has allowed to carry out an initial evaluation of metric accuracy.

Introduzione

Nell'ambito della documentazione dei Beni Culturali la generazione di modelli di superficie (*Digital Surface Model* – DSM) di oggetti di piccole e medie dimensioni è attualmente resa possibile soprattutto grazie alla disponibilità di strumenti laser a triangolazione ottica o di strumenti a luce strutturata. Con tali strumenti è infatti possibile realizzare modelli tridimensionali con un elevato grado di dettaglio e con precisione nell'ordine del decimo di millimetro. Rilievi di reperti archeologici possono essere condotti in maniera abbastanza agevole soprattutto nei musei o in locali adibiti alla loro conservazione e custodia mentre situazioni più complesse possono presentarsi durante il rilievo in situ a causa delle particolari condizioni operative che si possono incontrare. Inoltre, l'impegno economico richiesto per rilievi di questo tipo può in alcuni casi risultare eccessivamente oneroso.

Una valida alternativa per la generazione di modelli di superficie è rappresentata dalle procedure di autocorrelazione della fotogrammetria digitale. Tali procedure, disponibili nei più diffusi software di fotogrammetria, hanno visto recentemente un ulteriore sviluppo delle loro potenzialità che hanno portato ad ottenere prodotti paragonabili dal punto di vista dell'accuratezza metrica e del livello di dettaglio a quelli generati con il laser scanner o con strumenti a luce strutturata.

Il lavoro svolto si è posto come obiettivo quello di verificare la precisione dei modelli di superficie ottenuti con tecniche fotogrammetriche tramite il confronto con quelli ottenuti con strumenti laser scanner.

Nell'ambito delle attività di ricerca del Dipartimento di Rappresentazione dell'Università di Palermo sono stati infatti eseguiti molteplici rilievi di reperti archeologici con strumentazioni laser a triangolazione ottica. In particolare sono stati rilevati le "piccole metope" di Selinunte, la metopa di Artemide e Atteone proveniente dal tempio E di Selinunte (D'Amelio S. et al., 2005), i frammenti del tempio B di Selinunte (Carra G. et al., 2008) e un reperto lapideo raffigurante un bovide proveniente dalla grotta del Genovese di Levanzo (TP), tutti conservati presso il museo Archeologico Regionale A. Salinas di Palermo. I dati laser acquisiti durante le varie ricerche sono stati presi come riferimento per effettuare delle operazioni di analisi e comparazione di modelli di superficie ottenuti fotogrammetricamente. In alcuni casi sono stati utilizzati rilievi fotogrammetrici già disponibili, mentre per altri casi è stato necessario programmare delle nuove campagne di rilievo fotogrammetrico.

Come primo caso di studio è stata scelta una delle "piccole metope" di Selinunte raffigurante "Europa rapita dal toro" costituita da un basso rilievo di dimensioni pari a 0.67 m di larghezza per 0.84 m di altezza. Di tale reperto, oltre alla scansione laser, erano disponibili delle prese eseguite con una camera digitale semimetrica. La generazione dei DSM fotogrammetrici è stata effettuata con due differenti software commerciali: Socet Set 5.4 e PhotoModeler Scanner. La comparazione dei DSM ottenuti ha consentito di effettuare delle prime valutazioni dal punto di vista metrico tra le tecniche fotogrammetriche e il laser scanner.

Rilievo laser

Il rilievo laser della metopa è stato eseguito con uno scanner a triangolazione ottica Minolta Vivid 9i. Tale dispositivo permette di ottenere modelli tridimensionali a *mesh* triangolare con elevata accuratezza e in tempi relativamente ridotti. Lo strumento è dotato di tre lenti: TELE, MIDDLE e WIDE cui corrispondono rispettivamente tre differenti focali. Con una lente tipo Tele e una distanza dall'oggetto di 0.6 m, l'accuratezza teorica nelle tre dimensioni X, Y, Z è pari a ± 0.050 mm mentre la precisione nella direzione dell'asse Z risulta pari a ± 0.008 mm. Tali precisioni vanno riferite a misure eseguite in laboratorio con reticolo di calibrazione e a temperatura controllata e pertanto, difficilmente raggiungibili nelle normali condizioni operative. Per ogni singola scansione vengono acquisiti, alla massima risoluzione, circa 300000 punti in un tempo di 2.5 secondi.

Per il rilievo della metopa si è scelto di utilizzare una lente tipo TELE in modo da potere ottenere un modello con la massima accuratezza possibile. Complessivamente sono state eseguite 35 scansioni da una distanza media di 0.6 m (Figura 1). Il numero delle scansioni, certamente elevato per le dimensioni dell'oggetto indagato è stato determinato dalla necessità di ottenere un modello completo della superficie scultorea privo di eventuali "buchi" nella *mesh*.

Durante la fase di acquisizione le scansioni sono state preregistrate attraverso la collimazione di punti omologhi ben riconoscibili nelle zone di sovrapposizione tra le scansioni. Le scansioni della metopa, inizialmente costituite complessivamente da circa 8700000 punti, sono state ridotte a circa 200000 punti attraverso procedure di filtraggio e decimazione; ciò ha permesso di diminuire la ridondanza dei punti nelle zone di sovrapposizione e di ridurre complessivamente il numero di punti in relazione alla curvatura della superficie passando da un valore iniziale di distanza tra due punti di circa 0.3 mm ad una distanza media di 1.5 mm (Figura 2). Tale procedura non ha influito sull'affidabilità metrica del modello di superficie prodotto.

Il processo di post-elaborazione è stato completato con una registrazione globale e la successiva unione di tutte le scansioni. La deviazione standard relativa al processo di registrazione è risultata pari a 0.16 mm che può essere considerato come riferimento per valutare l'accuratezza effettiva della superficie rilevata.

L'ultimo passo del lavoro è stato quello di riferire il modello tridimensionale della metopa nello stesso sistema utilizzato per orientare i progetti fotogrammetrici. A tale scopo sono stati utilizzati 3 punti di appoggio "naturali" rilevati durante il rilievo topografico.



Figura 1 – Rilievo con il laser scanner Minolta Vivid 9i



Figura 2 – DSM laser

Rilievo fotogrammetrico

Il rilievo fotogrammetrico è stato condotto contestualmente al rilievo laser usando una camera digitale semimetrica Rollei D7⁵ con una focale di 7.43 mm, un sensore CCD da 5 mega-pixel e un pixel di lato pari a 3.5 m. L'impiego di una camera semimetrica ha, per questo primo test, evitato di eseguire procedure di autocalibrazione. Complessivamente sono state realizzate 5 prese: due prese stereoscopiche, tre secondo uno schema di presa convergente. Le prese stereoscopiche sono state eseguite da una distanza di 3.30 m con una base di 0.80 m. Le immagini sono quindi risultate con un ricoprimento longitudinale di circa il 80%, una scala media pari a circa 1:450 e una dimensione del pixel terreno (*Ground Sample Distance – GSD*) di circa 1.6 mm. Le tre prese convergenti sono state eseguite da una distanza di 2.20 m secondo uno schema che ha previsto una presa centrale e due laterali; l'angolo tra gli assi ottici delle due prese più esterne è risultato di circa 20°. Le immagini hanno una scala media di 1:300 e un GSD di circa 1 mm.

Contestualmente alle operazioni di rilievo fotogrammetrico è stato eseguito un rilievo topografico di alcuni punti di appoggio; quattro punti di appoggio sono stati pre-segnalizzati esternamente alla metopa, mentre 7 punti sono stati rilevati prendendo in considerazione punti "naturali". Per le operazioni di orientamento si è scelto di utilizzare soltanto i quattro punti pre-segnalizzati e un unico punto "naturale" molto ben individuabile.

Un primo progetto fotogrammetrico è stato eseguito con il software Socet Set 5.4.1 utilizzando esclusivamente la coppia stereoscopica dei fotogrammi. Lo scarto quadratico medio in XYZ dei residui sui punti di appoggio nel calcolo dell'orientamento esterno è risultato pari a 0.001 m. La realizzazione del DSM è stata condotta tramite il modulo NGATE (*Next Generation Automatic Terrain Extraction*); tale modulo rappresenta una evoluzione delle classiche procedure di *area-based matching* contenute nel modulo ATE (*Automatic Terrain Extraction*) di Socet Set 5.4.1 per estrazione automatica di DSM in quanto implementa sia algoritmi di *area-based matching* sia di *feature-based matching*. Il DSM è stato calcolato secondo un grigliato regolare imponendo un passo di 3 mm (Figura 3), pari a circa 2 pixel, e utilizzando un centinaio di punti sparsi (denominati *seed points*) per la stima della superficie approssimata da determinare.

Un secondo progetto è stato realizzato con il software PhotoModeler Scanner 6.0 che rappresenta una evoluzione della ben nota versione base che integra procedure di autocorrelazione a partire da prese convergenti. Il progetto è stato realizzato utilizzando i cinque fotogrammi disponibili (le due prese stereoscopiche e le tre prese convergenti) orientati con un unico calcolo di *bundle adjustment* ottenendo uno scarto quadratico medio in XYZ sui punti d'appoggio di 0.004 m. Per il calcolo del

DSM il software PhotoModeler Scanner fornisce la possibilità di utilizzare tutte le possibili coppie di fotogrammi contenute nel progetto. Tale condizione risulta particolarmente utile soprattutto in quei casi dove la presenza di sporgenze o rientranze sugli oggetti da rilevare potrebbe provocare delle zone non visibili nelle prese normali che, quindi, potrebbero essere “coperte” dalle prese più inclinate. Nel nostro caso sono state eseguite sostanzialmente due prove considerando la coppia di fotogrammi stereoscopici e la coppia costituita dall’immagine centrale e dall’immagine destra delle prese convergenti. Non è stata presa in considerazione l’immagine sinistra delle prese convergenti in quanto era abbastanza scadente dal punto di vista radiometrico. I due DSM prodotti sono risultati molto simili; per questo motivo si è scelto di utilizzare il DSM prodotto dalle prese convergenti. Anche in questo caso è stata determinata una griglia regolare con un passo di 3 mm, corrispondente a circa 3 pixel delle immagini utilizzate (Figura 3).

Per avere una indicazione sulla precisione nelle determinazioni altimetriche si è considerata la formula per il calcolo dello scarto quadratico medio (s.q.m.) teorico per la componente altimetrica nel caso di prese normali (Kraus, 1994)

$$\#_z \approx \frac{Z^2}{c^2 b} \#_{\text{pixel}}$$

dove $\#_z$ rappresenta lo s.q.m. in altimetria, Z la distanza di presa, c la distanza principale, b la base di presa e $\#_{\text{pixel}}$ lo s.q.m. nella misura dei punti immagine. In particolare per $\#_{\text{pixel}}$ è stato considerato un valore pari alla dimensione di mezzo pixel.

La formula è stata utilizzata anche per i progetti con le prese convergenti, in quanto l’angolo tra gli assi ottici della presa centrale e di quella laterale è abbastanza contenuto. I valori calcolati sono risultati pari a 3.3 mm per il progetto eseguito con Socet Set e 1.6 per quello realizzato con PhotoModeler Scanner.

Analisi e comparazione dei DSM

L’analisi e i confronti tra DSM sono stati eseguiti utilizzando il software Geomagic. Una prima verifica è stata condotta ricostruendo le superfici a partire dai dati fotogrammetrici e controllando visivamente la presenza di eventuali lacune o zone anomale. In entrambi i casi non si sono

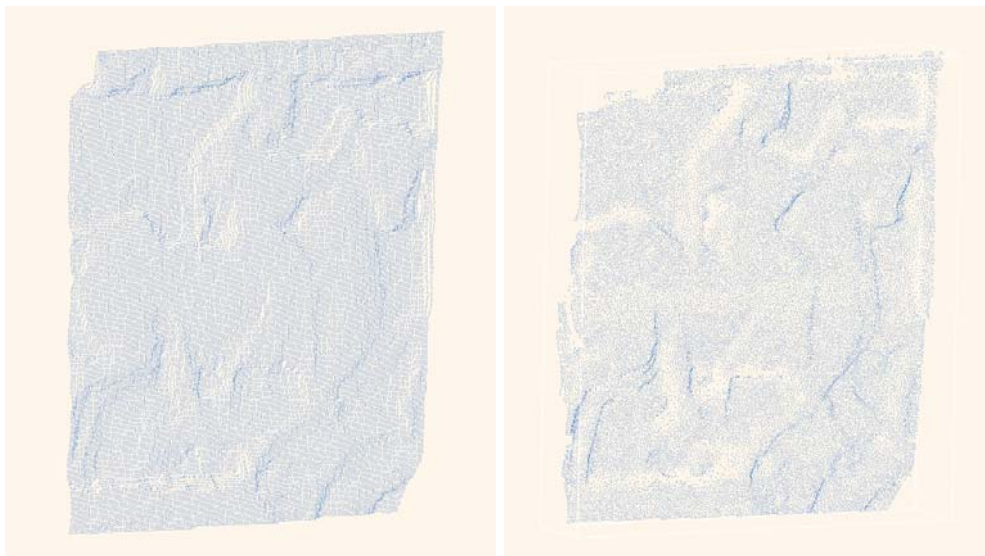


Figura 5 – Punti 3D calcolati con Socet Set (a sinistra) e con PhotoModeler (a destra)

riscontrati particolari problemi e non si è quindi intervenuto con operazioni di editing.

Il confronto è stato eseguito considerando la superficie ottenuta dal rilievo laser come priva di errori e calcolando le differenze in altimetria con i DSM fotogrammetrici. L'ipotesi di considerare, in questo caso, il DSM laser come superficie di riferimento è dovuto al fatto che tale superficie è stata rilevata con uno strumento che consente di ottenere precisioni di un ordine di grandezza superiori a quelle teoriche del rilievo fotogrammetrico.

Un primo confronto tra il DSM laser e i DSM fotogrammetrici ha permesso di calcolare i valori statistici più significativi delle differenze in altimetria; in particolare sono stati determinati gli scostamenti massimi positivi e negativi, la media e la deviazione standard. La tabella 7 riassume schematicamente i valori ottenuti.

	Max positivo [m]	Max negativo [m]	Media [m]	Dev. Standard [m]
%+! . - (\$'./.%+! .+" \$*.\$*	0.0354	-0.0265	0.0180	0.0063
%+! . - (\$'./.%+! .&) ""! "#\$,\$' .+ - \$'	0.0344	-0.0225	0.0186	0.0055

Tabella 7 – Parametri statistici delle differenze in altimetria

Come si può notare il valore della media risulta particolarmente alto tale da indicare la presenza di un evidente errore sistematico tra i dati laser e quelli fotogrammetrici. Tale sistematismo è probabilmente dovuto ad una non perfetta registrazione del DSM laser nel sistema di riferimento topografico. La registrazione dei dati laser è infatti avvenuta utilizzando dei punti naturali non sempre perfettamente individuabili sulla *mesh* laser.

Per eliminare l'effetto di questo sistematismo si è quindi effettuata una nuova registrazione tra il DSM laser e i DSM fotogrammetrici. I nuovi parametri calcolati evidenziano l'assenza di eventuali sistematismi tra i dati considerati (Tabella 8). La deviazione standard calcolata nel confronto con il DSM Socet Set risulta compatibile con le precisioni teoriche stimate; mentre la deviazione standard relativa al confronto con il DSM Photomodeler Scanner è circa il doppio del valore teorico calcolato.

	Max positivo [m]	Max negativo [m]	Media [m]	Dev. Standard [m]
%+! . - (\$'./.%+! .+" \$*.\$*	0.0218	-0.0165	-0.0001	0.0042
%+! . - (\$'./.%+! .&) ""! "#\$,\$' .+ - \$'	0.0356	-0.0244	0.0004	0.0036

Tabella 8 - Parametri statistici delle differenze in altimetria dopo la registrazione delle superfici

In entrambi i casi si riscontrano scostamenti massimi nell'ordine di qualche centimetro che evidenziano la presenza di errori grossolani nelle procedure di correlazione. Una analisi più accurata della rappresentazione grafica delle differenze mostra che la maggior parte di questi errori è localizzata nelle zone più critiche per il processo di correlazione, come le zone di discontinuità o le zone di bordo della *mesh* (Figure 9 e 10).

Conclusioni

La sperimentazione condotta rappresenta una prima verifica sperimentale delle potenzialità delle tecniche fotogrammetriche per l'estrazione di DSM di reperti archeologici di piccole e medie dimensioni.

I risultati conseguiti sono molto incoraggianti e hanno mostrato che dal punto di vista metrico le precisioni ottenute per i DSM fotogrammetrici sono compatibili con quelle calcolate teoricamente. Tuttavia l'accuratezza dei DSM fotogrammetrici non è paragonabile con quella dei DSM laser.

Tale condizione è sicuramente correlata con la risoluzione delle immagini utilizzate, la scala delle immagini e con la precisione delle coordinate dei punti di appoggio topografici.

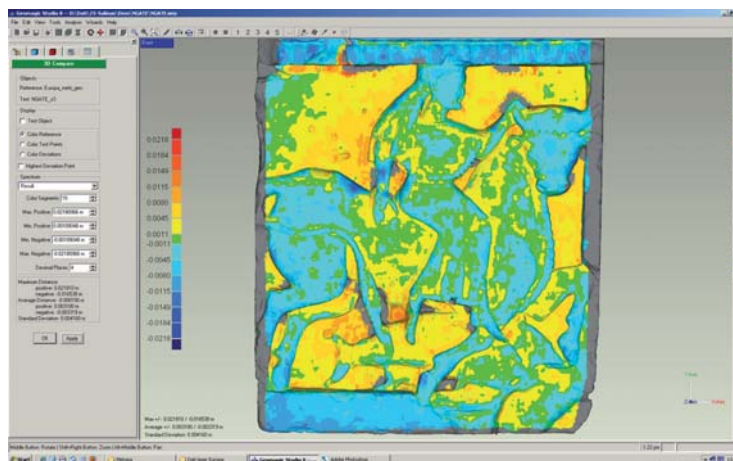


Figura 9 – Confronto DSM Laser DSM Socet Set

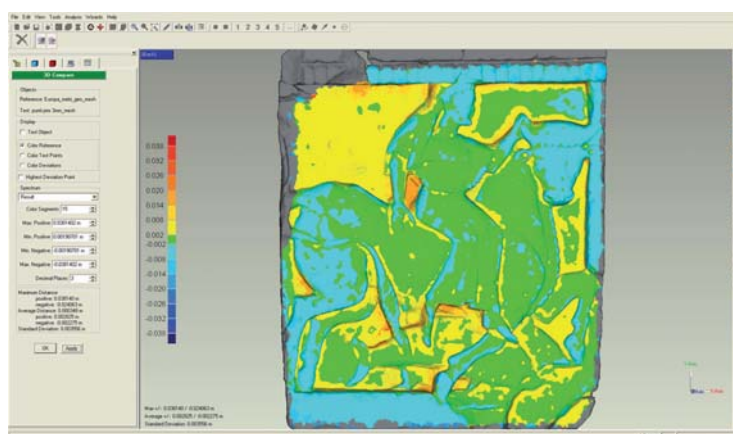


Figura 10 – Confronto DSM Laser DSM Photomodeler

Sono attualmente in corso di svolgimento ulteriori verifiche utilizzando i dati laser dei reperti archeologici rilevati nel corso degli anni. Le prove saranno condotte utilizzando camere digitali non metriche ad alta risoluzione, procedure di orientamento senza punti di appoggio e software con caratteristiche differenti in modo da valutare la possibilità di ottenere DSM molto prossimi, in termini di accuratezza metrica e di risoluzione spaziale, a quelli prodotti con i sistemi laser.

Riferimenti bibliografici

- Carra G., D'Amelio S., Villa B. (2008), "The Virtual Reconstruction of the Temple Bin Selinunte Excavation Site", *Atti del XXI International ISPRS Congress, Beijing CHINA 2008*.
- D'Amelio S., Emmolo D., Lo Brutto M., Orlando P., Villa B. (2005), "3D techniques for the survey of cultural heritages", *Atti del XX International Symposium CIPA 2005*.
- Kraus K. (trad. Dequal S.) (1994), *Fotogrammetria*, Libreria Universitaria Levrotto e Bella, Torino, Vol 1.
- Menna F. Remondino F. (2008) "Image-Based Surface Measurement for Close-Range Heritage Documentation", *Atti del XXI International ISPRS Congress, Beijing CHINA 2008*