

Sperimentazione di procedure automatiche in fotogrammetria *close-range* per il rilievo di Beni Culturali

Mauro Lo Brutto, Maria Grazia Spera

DICA, Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale, Università di Palermo
Viale delle Scienze, 90128 Palermo, e-mail mauro.lobrutto@unipa.it, mariagraziaspera@hotmail.it

Riassunto

Lo sviluppo di procedure automatiche in fotogrammetria *close-range* rappresenta attualmente un interessante argomento di ricerca soprattutto per quanto riguarda la fase di orientamento delle immagini. L'automazione del processo è principalmente dovuta all'integrazione tra tecniche derivate dalla *Computer Vision* e tecniche fotogrammetriche che ha consentito di sviluppare software scientifici e commerciali che consentono di eseguire automaticamente il processo di orientamento.

L'obiettivo dello studio svolto è quello di eseguire una prima verifica sulle potenzialità delle procedure automatiche disponibili nel software PhotoModeler Scanner 2011 della EOS Systems. Tali procedure utilizzano la strategia della "*Structure from Motion*" che consente di orientare automaticamente anche un numero molto elevato di immagini. Differenti casi studio, dal punto di vista della forma, della dimensione, del materiale e dei dettagli architettonici, sono stati presi in considerazione per le operazioni di verifica.

Abstract

The development of automatic procedures in close-range photogrammetry is an interesting research topic today especially for the images orientation. The integration of Computer Vision and photogrammetric techniques allows the automation of the process. These techniques have allowed the development of scientific and commercial softwares to automate the process of orientation.

The aim of the study is to test the potential of automated procedures available in the software PhotoModeler Scanner 2011 by EOS Systems. These procedures use the strategy called "Structure from Motion", that automatically orients a large number of images. Different objects were considered for the test in terms of shape, size, materials and architectural details.

Introduzione

La documentazione e la rappresentazione dei Beni Culturali sono da sempre alcuni dei principali argomenti di studio nel campo delle possibili applicazioni della geomatica. In particolare, le attività di ricerca sono indirizzate sia verso lo studio delle possibili applicazioni di strumenti laser con prestazioni sempre più avanzate dal punto di vista della velocità di acquisizione, della accuratezza metrica, delle portate, sia verso lo sviluppo di procedure fotogrammetriche terrestri che consentono un elevato livello di automazione. Quest'ultimo aspetto è diventato un'interessante tematica di ricerca soprattutto per lo sviluppo di procedure fotogrammetriche *close-range* capaci di eseguire in modalità automatica l'intero processo di modellazione tridimensionale. In particolare, le varie fasi di modellazione tridimensionale con tecniche fotogrammetriche possono essere suddivise in: processo di calibrazione della camera, orientamento delle immagini, calcolo della "nuvola di punti", ricostruzione e modellazione (anche tramite applicazione della *texture*) delle superfici dell'oggetto (Barazzetti et. al., 2011a). Tra tutte queste fasi, l'orientamento delle immagini in fotogrammetria *close-range* è stato per diverso tempo eseguito in modalità manuale soprattutto nell'ambito dei

rilievi di Beni Culturali. La difficoltà di applicare tecniche di orientamento automatiche per l'individuazione e la misura dei punti di legame, già da diversi anni utilizzate in fotogrammetria aerea, è soprattutto dovuta alle particolari forme degli oggetti architettonici e/o archeologici che producono immagini con forti variazioni di scala e agli schemi di presa, in genere di tipo convergente, difficilmente riconducibili a configurazioni standard (Barazzetti et. al., 2011b). Negli ultimi anni si è però assistito ad una sempre crescente integrazione tra tecniche derivate dalla *Computer Vision* e tecniche fotogrammetriche. Tale integrazione è una naturale conseguenza della convergenza di obiettivi che induce sia le tecniche della *Computer Vision* sia quelle fotogrammetriche ad utilizzare immagini digitali per la realizzazione di modelli 3D (Remondino & El-Hakim, 2006). Le due tecniche, anche se hanno la stessa finalità, pongono però particolare attenzione a due differenti aspetti del processo: nella *Computer Vision* l'obiettivo primario è l'automazione del processo, nella fotogrammetria l'accuratezza geometrica del prodotto finale (Barazzetti & Scaioni, 2010a).

L'attività scientifica svolta in ambito nazionale ha portato diversi gruppi di ricerca a sviluppare applicativi che sfruttano i principi della *Computer Vision* per orientare automaticamente sequenze di immagini in rilievi fotogrammetrici terrestri. In particolare, sono utilizzate quelle strategie di orientamento che in *Computer Vision* sono denominate "*Structure from Motion*" o "*Structure and Motion*"; tali strategie 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). L'approccio della "*Structure from Motion*" consente di orientare un numero anche molto elevato di immagini senza necessità di avere delle conoscenze preliminari sulle caratteristiche della camera o sullo schema di presa. Questa modalità di orientamento è impiegata con successo soprattutto in applicazioni web come quelle per la ricostruzione e la rappresentazione di scene (*Photosynth* della Microsoft) o quelle per la modellazione 3D di oggetti o scene (*Project Photofly* della Autodesk Lab). L'affidabilità dal punto di vista geometrico di queste applicazioni è in genere abbastanza limitata e comunque difficilmente valutabile per l'assenza di qualsiasi parametro relativo all'accuratezza del processo.

Gli applicativi scientifici sviluppati in ambito fotogrammetrico sono sostanzialmente basati sull'impiego delle tecniche di "*Structure from Motion*" per l'individuazione automatica dei punti di legame, sull'utilizzo di procedure di stima robuste per l'eliminazione di false corrispondenze ed *outlier* e sul classico approccio fotogrammetrico del *bundle adjustment* per il calcolo dei parametri di orientamento esterno. Si rimanda alla estesa bibliografia esistente sull'argomento (vedi per esempio Barazzetti et al. 2010b; Del Pizzo & Troisi, 2011; Roncella et al., 2011) per maggiori approfondimenti sulle diverse soluzioni adottate. Tali applicativi sono però limitati all'ambito scientifico e difficilmente utilizzabili per un uso generalizzato. Recentemente (fine 2010) è stata però rilasciata una nuova versione del ben noto software PhotoModeler Scanner (ver. 2011) della EOS Systems che implementa una serie di funzioni per l'orientamento automatico delle immagini adottando procedure tipiche della "*Structure from Motion*". Questa prima evoluzione dal punto di vista commerciale nei software di fotogrammetria terrestre sicuramente contribuisce a rendere più semplice ed automatico il rilievo fotogrammetrico soprattutto a vantaggio di tutti quegli utenti meno competenti che sempre più frequentemente si avvicinano ad applicazioni di questo tipo.

L'obiettivo che si è posto la ricerca svolta è stato quello di eseguire una prima verifica sulle reali potenzialità delle procedure automatiche del software PhotoModeler Scanner 2011 tramite l'utilizzo di una serie di differenti casi studio che sono serviti per valutare sperimentalmente la procedura adottata. Sono stati considerati alcuni blocchi fotogrammetrici relativi a rilievi di Beni Culturali con differenti caratteristiche dal punto di vista della forma, della dimensione, del materiale e dei dettagli architettonici; in particolare, gli oggetti presi in esame sono (Figura 1):

- Arula del Tempio della Vittoria conservata presso il museo del sito archeologico di Imera;
- Bassorilievo di Mosè custodito all'interno dell'ex Sanatorio dello Spasimo a Palermo;

- Antefissa a maschera gorgonica conservata presso il museo archeologico di Gela;
- Portale della chiesa di San Giacomo a Gela;
- Porta Aragonese facente parte del complesso del Castello a Mare a Palermo.

I vari oggetti sono rappresentativi di due differenti tipologie di Beni Culturali: quelli di piccole dimensioni (come l'Arula, il Bassorilievo di Mosè e l'Antefissa a maschera gorgonica), che richiedono un elevato livello di dettaglio, e quelli a scala architettonica (come il Portale della chiesa di San Giacomo e la Porta Aragonese), che richiedono un livello di dettaglio inferiore e che comportano problematiche di acquisizioni che dipendono soprattutto dalle condizioni logistiche dei luoghi.

Le fasi del lavoro sono state suddivise in una prima fase di progettazione ed esecuzione delle prese, una seconda fase di esecuzione automatica dell'orientamento, individuando e verificando caso per caso i parametri di input più idonei per ottenere i risultati più soddisfacenti, e una fase finale di estrazione automatica di "nuvole di punti" e di modellazione tridimensionale dei Beni Culturali rilevati.

Tutti i rilievi, tranne quello dell'Arula che è stato realizzato con una camera digitale Canon EOS Mark II, sono stati effettuati con una camera digitale Nikon D3000. Le camere sono sempre state preventivamente calibrate prima di procedere con gli orientamenti.

I risultati conseguiti hanno consentito di effettuare alcune valutazioni relativamente alle procedure adottate e all'accuratezza ottenuta.

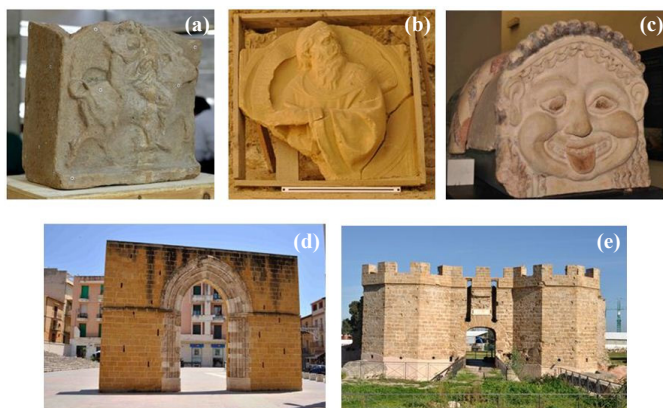


Figura 1 – (a) Arula del Tempio della Vittoria, (b) Bassorilievo di Mosè, (c) Antefissa a maschera gorgonica (d) Portale della Chiesa di S. Giacomo, (e) Porta Aragonese.

Procedure di rilievo

I Beni Culturali individuati per l'esecuzione delle prove sono stati scelti in modo da soddisfare alcuni requisiti minimi per consentire sia l'automazione del processo sia la loro successiva modellazione in 3D. In particolare, sono state valutate la policromia e le caratteristiche dei materiali in quanto sia l'eventuale presenza di superfici troppo omogenee e/o riflettenti sia l'uniformità cromatica potrebbe essere fonte di errore nell'individuazione dei punti omologhi.

Per quanto riguarda l'esecuzione delle riprese fotogrammetriche è stato adottato un approccio di tipo multi-immagine, con prese di tipo convergenti. In quasi tutti i casi si è ipotizzato uno schema a sequenza singola chiusa in maniera tale da avere dei blocchi sufficientemente regolari per ottimizzare i tempi di elaborazione. In alcuni casi la sequenza principale è stata integrata da ulteriori sequenze in posizioni differenti per consentire la corretta chiusura del blocco fotogrammetrico.

Soltanto nel caso del Bassorilievo di Mosè non è stato possibile girare attorno all'oggetto ed è stata eseguita una sequenza aperta.

Durante la fase di presa si è inoltre posto attenzione al ricoprimento tra i fotogrammi successivi e alla porzione di fotogramma occupata dall'oggetto. Per quanto riguarda il ricoprimento sono state considerate basi di presa abbastanza piccole, in rapporto alle dimensioni dell'oggetto del rilievo e alle distanze di presa. In questo modo è possibile contenere variazioni prospettiche e cromatiche tra una presa e la successiva. L'abbracciamento del fotogramma sull'oggetto è stato scelto per ogni manufatto in modo da minimizzare lo sfondo che per prese convergenti a 360° cambia continuamente e quindi può facilmente dare luogo a false correlazioni (Figura 2).



Figura 1 – Esempio di come varia lo sfondo tra due immagini in sequenza (Antefissa a maschera gorgonica).

La distanza di presa e la focale sono state definite in maniera tale che l'oggetto del rilievo rientri nell'intero formato dell'immagine e che il valore di GSD (*Ground Sample Distance*) risulti inferiore al millimetro per gli oggetti a grande scala e di qualche millimetro per quelli a scala architettonica. Sono stati quindi ipotizzati i parametri di presa più congeniali per ogni caso studio ed è stato valutato il numero di fotogrammi per garantire un ricoprimento longitudinale tra le immagini successive dell'80% circa (Tabella 1).

Oggetto	Distanza di presa [m]	Focale [mm]	N. foto	GSD [mm]
Arula del Tempio della Vittoria	1.25	50	28	0.15
Bassorilievo di Mosè	2.00	55	15	0.22
Antefissa a maschera gorgonica	1.20	35	36	0.21
Portale Chiesa S. Giacomo	14.00	24	24	3.56
Porta Aragonese	30.00	35	46	5.23

Tabella 1 – Dati di progetto delle prese fotogrammetriche.

Le procedure adottate per la calibrazione delle camere sono state in alcuni casi quelle standard previste dal software PhotoModeler Scanner adoperando il reticolo di calibrazione (Arula del Tempio della Vittoria, Antefissa a maschera gorgonica) mentre in altri casi effettuando calibrazioni *on-the-job* con prese opportunamente realizzate e con foto ruotate di $\pm 90^\circ$ (Bassorilievo di Mosè, Portale della Chiesa di S. Giacomo, Porta Aragonese).

Il modulo di orientamento automatico di blocchi *close-range* sviluppato nel software PhotoModeler Scanner 2011 e denominato *SmartMatch* consente di individuare automaticamente punti omologhi tra i fotogrammi utilizzando uno degli operatori di interesse più utilizzati nelle applicazioni di *Computer Vision*; in particolare, la ricerca dei punti corrispondenti viene eseguita tramite l'operatore denominato SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform* – Lowe, 2004). L'operatore SIFT rappresenta uno standard in molte applicazioni della *Computer Vision* e in molti applicativi

fotogrammetrici di tipo scientifico; è un operatore invariante rispetto a variazioni di scala e rotazioni delle immagini.

La funzione *SmartMatch* può svolgere diversi compiti:

- Orientare le immagini
- Generare una nuvola di punti a bassa densità
- Creare nuvole di punti approssimate, definendo la base per il calcolo di un successivo DSM.

Nell'esecuzione dell'orientamento automatico è possibile impostare alcuni parametri per migliorare e velocizzare il calcolo. Per esempio può essere definita la sequenza di foto che verranno usate nel progetto come sequenze "irregolari" o "disordinate", nel caso in cui la sequenza non è strutturata secondo uno schema prefissato, o come sequenza "regolare" o "ordinata", che può essere aperta o chiusa, nel caso in cui la successione dei fotogrammi segue il classico schema della strisciata fotogrammetrica. È evidente che la possibilità di lavorare con sequenze "ordinate" riduce i tempi di calcolo e la probabilità di eventuali errori in quanto la ricerca di punti omologhi viene svolta su immagini vicine non estendendo il processo all'intero blocco.

È possibile inoltre definire il numero massimo di punti omologhi (*SmartPoints*) da individuare su ogni singola immagine, il numero di immagini in sequenza da accoppiare su cui effettuare la ricerca degli *SmartPoints* e una soglia limite (*Cutoff Theshold*), definita in percentuale, che imposta il minimo numero di relazioni che deve avere una coppia di punti per essere riconosciuta fra gli *SmartPoints*.

Nell'ultima fase del rilievo fotogrammetrico finalizzato all'estrazione automatica di "nuvole di punti" e alla modellazione tridimensionale dei Beni rilevati si è sfruttato la disponibilità dei punti calcolato in fase di orientamento per disporre di un modello a bassa risoluzione dell'oggetto da utilizzare come base di partenza per il calcolo di un modello 3D ad elevata risoluzione. Individuando le coppie di immagini con un adeguato rapporto base/distanza di presa è possibile ricalcolare e ottimizzare con tempi di elaborazione molto ridotti la superficie dell'oggetto.

Arula del Tempio della Vittoria

L'Arula in esame è un reperto del Tempio della Vittoria del sito archeologico a Imera. Dalle documentazioni storiche si deduce che il Tempio della Vittoria fu costruito intorno al 480 a. C. quando il sito di Imera era una colonia greca di notevole importanza. Del Tempio, che presentava caratteristiche simili a quelle dei templi agrigentini, sono rimaste soltanto poche tracce; la maggior parte di frammenti e dei reperti è conservata presso il museo archeologico dello stesso sito. L'Arula è una piccola ara con decorazione a rilievo su uno dei lati raffigurante un vecchio alato in volo che trasporta il corpo esanime di un giovinetto, probabilmente riferibile al mito di Dedalo e Icaro.

L'Arula ha dimensioni abbastanza ridotte (32 cm x 26 cm x 15cm) ed è stata rilevata con una sequenza ordinata e chiusa di immagini con una distanza camera-oggetto e una base di presa molto regolari grazie alle favorevoli condizioni logistiche. Inoltre, l'impiego di un dispositivo di illuminazione artificiale ha garantito l'assenza di variazioni cromatiche significative tra le immagini.

La procedura per l'orientamento automatico è riuscita ad orientare in pochi minuti tutto il blocco nonostante nelle prese laterali l'oggetto occupi soltanto una piccola parte del fotogramma (Figura 3). Il modello fotogrammetrico è stato messo in scala grazie all'impiego di due barre calibrate collocate sul fronte e sul retro dell'Arula. La nuvola a bassa risoluzione è stata utilizzata come base per il successivo calcolo del modello 3D con un passo di 1mm (Figura 4).

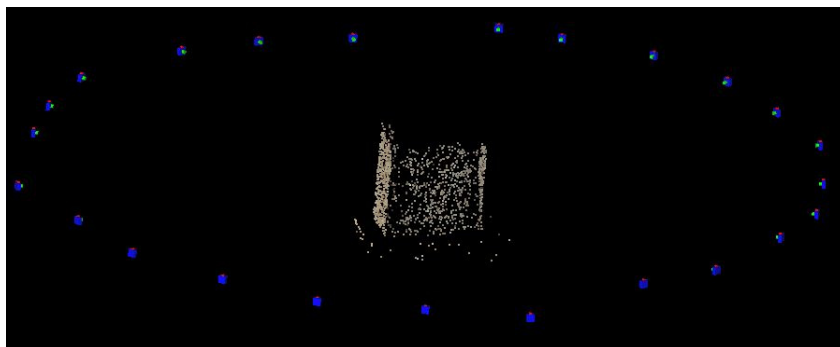


Figura 3 – Schema delle prese dell'Arula.

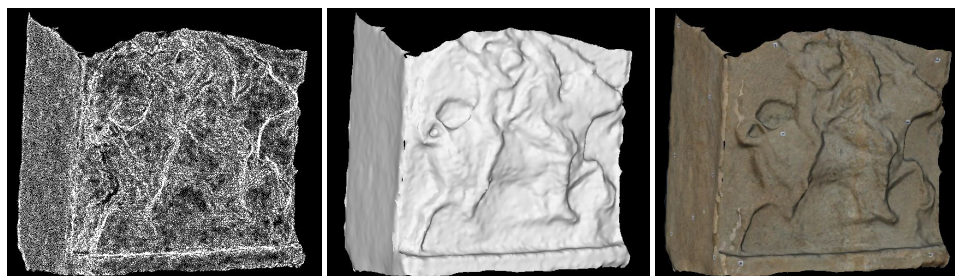


Figura 4 – Visualizzazione per punti (a sinistra), shaded (centrale) e con texture (a destra) del modello 3D dell'Arula del Tempio della Vittoria.

Bassorilievo di Mosè

Il Bassorilievo di Mosè è custodito all'interno dell'ex Sanatorio dello Spasimo, meglio conosciuto con il nome di chiesa di Santa Maria dello Spasimo. La chiesa si trova nel quartiere della Kalsa, uno dei più antichi quartieri della città di Palermo. L'antico edificio fu costruito nel 1509 e negli anni ha cambiato diverse volte destinazione d'uso passando da chiesa, a sede per spettacoli pubblici, a lazzaretto per gli ammalati, a granaio e magazzino. Attualmente è stato ristrutturato ed adibito a sede espositiva e per spettacoli e rappresentazioni.

Il Bassorilievo di Mosè è un oggetto di ridotte dimensioni (77 cm x 58 cm x 12 cm) che è stato rilevato con una sequenza ordinata aperta di 12 foto. La fase di presa è risultata un po' problematica per le condizioni di luminosità del sito in quanto il Bassorilievo è posto a terra sotto un portico privo di illuminazione artificiale. Le immagini sono infatti risultate poco nitide. Si è però preferito non rifare le prese per disporre anche di un set di immagini non proprio ideali.

Impostati i parametri per la ricerca dei punti omologhi si è proceduto con l'orientamento automatico. Nonostante le basse aspettative, il processo di orientamento è andato a buon fine in meno di un minuto (Figura 5).

La scala del modello fotogrammetrico è stata definita grazie all'impiego di tre barre calibrate collocate una sul fronte e due sui lati del bassorilievo. In particolare, ne sono state usate due per definire la scala ed una come controllo; quest'ultima ha riportato un residuo di 0,02 mm.

A partire dalla "nuvola di punti" realizzata in fase d'orientamento, è stata applicata la procedura di autocorrelazione a due coppie di fotogrammi calcolando un modello 3D con un passo di 4 mm (Figura 6).

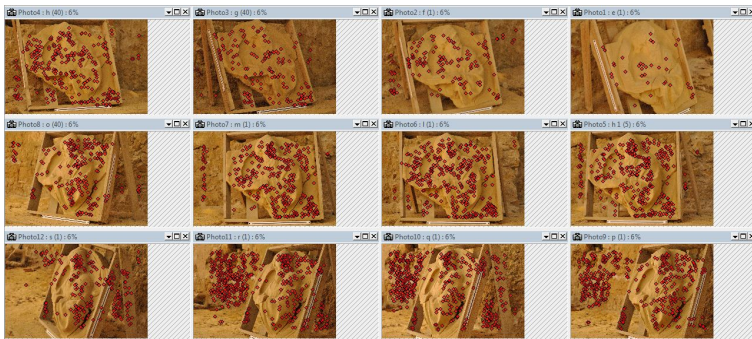


Figura 5 – SmartPoints individuati automaticamente per il Bassorilievo di Mosè.

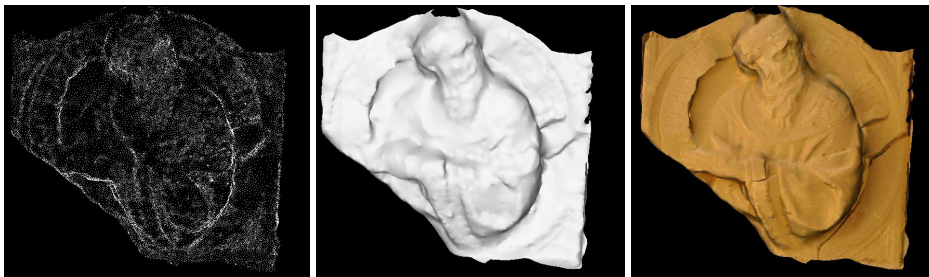


Figura 6 – Visualizzazione per punti (a sinistra), shaded (centrale) e con texture (a destra) del modello 3D del Bassorilievo di Mosè.

Antefissa a maschera gorgonica

L'antefissa è un elemento che solitamente era posto sulla testata delle travi del tetto o a occlusione dei canali terminali delle tegole. L'Antefissa a maschera gorgonica presa in considerazione risale all'età greca intorno al VI secolo a.C. è una delle sculture in terracotta più importanti della collezione del museo archeologico di Gela.

Anche questo oggetto è di ridotte dimensioni (30 cm x 30 cm x 90 cm) ma è caratterizzato da estensioni diverse nei vari lati; inoltre, le caratteristiche cromatiche nei due lati lunghi dell'oggetto sono un po' diverse. Le prese sono state realizzate secondo una sequenza ordinata da circa 1.20 m.

Il calcolo dell'orientamento è risultato più difficoltoso del previsto. Il collegamento tra i due lati lunghi è risultato problematico; in particolare, anche se l'orientamento sembrava risolto, la posizione delle camere e dei punti sui lati lunghi era completamente sbagliata.

È stato quindi necessario individuare in maniera più opportuna i parametri di ricerca dei punti omologhi e inserire, nella parte relativa alla maschera, delle foto realizzate da una distanza inferiore (1 m); in questo modo si è riusciti ad orientare correttamente tutta la sequenza (Figura 7). Questa situazione evidenzia come, anche avendo a disposizione strumenti software sufficientemente potenti dal punto di vista del calcolo e facilmente utilizzabili, in situazioni particolari è comunque indispensabile avere delle conoscenze teoriche che consentono di intervenire per migliorare le procedure di elaborazione.

Per la messa in scala del modello fotogrammetrico sono state posizionate 4 barre calibrate, una per lato. Le due barre sui lati lunghi sono state utilizzate per definire la scala, mentre quelle collocate sul fronte e sul retro sono state usate come controllo; queste ultime hanno riportato un residuo di 0,19 mm e 0,45 mm. Successivamente, utilizzando la nuvola di punti a bassa risoluzione derivante dalla fase di orientamento, è stato calcolato un modello 3D con un passo di 6 mm sfruttando 7 coppie di immagini (Figura 8).

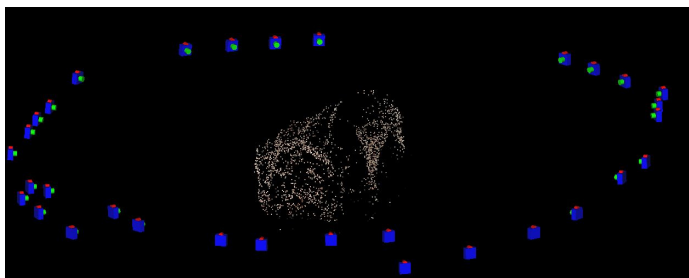


Figura 7 – Schema delle prese dell'Antefissa.



Figura 8 – Visualizzazione per punti (a sinistra), shaded (centrale) e con texture (a destra) del modello 3D dell'Antefissa Gorgonica.

Portale della chiesa di San Giacomo

Il portale dell'antica chiesetta di S. Giacomo risale al XIV secolo ed è caratterizzato da un arco a sesto acuto di modeste dimensioni pari a circa 9,00 m x 6,80 m x 0,90 m. Nel 1951 l'antica chiesetta è stata demolita per far spazio all'oratorio della nuova chiesa, costruita adiacente alla vecchia. Visto l'importanza architettonica dell'arco, prima di procedere con la demolizione, si è deciso di numerare e conservare i pezzi che lo costituivano. Successivamente alcune associazioni si sono interessate al recupero e alla ricostruzione di quest'ultimo; così negli anni ottanta fu redatto il primo progetto e dopo circa mezzo secolo (1999), con l'ausilio di vecchie foto che ritraevano il portale e della numerazione dei pezzi che lo costituiscono, sono stati ultimati i lavori.

Il portale è posizionato in una piazza con ampia libertà di movimento; ciò ha consentito di eseguire una sequenza chiusa di immagini pressoché dalla stessa distanza.

Nella fase di orientamento si è riscontrato un problema dovuto dalle diverse dimensioni dei prospetti. Infatti, i due prospetti laterali hanno dimensioni ridotte rispetto agli altri due. Tale condizione non consentiva di collegare la sequenza del prospetto principale con il prospetto interno (Figura 9).

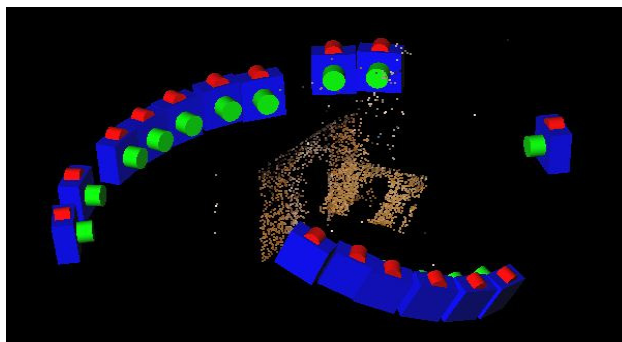


Figura 9 – Schema delle prese relative all'orientamento non corretto del Portale di S. Giacomo.

Si è quindi provato a variare i parametri di orientamento soprattutto per quanto riguarda il numero di foto in sequenza su cui cercare punti omologhi. Impostando la ricerca su sei foto vicine, anche se i punti trovati sui prospetti minori erano pochi è aumentata la loro molteplicità, che unita ad una buona ridondanza di punti nei prospetti più grandi, ha permesso l'orientamento del blocco. Soltanto una immagine della sequenza relativa al lato corto non è stata orientata a causa delle dimensioni ridotte del portale e delle notevoli differenze nello sfondo con le immagini vicine; considerando l'elevato ricoprimento tra le foto la sequenza è stata comunque chiusa correttamente (Figure 10). La scala del modello fotogrammetrico è stata definita grazie a delle misure rilevate durante la fase di ripresa e anche in questo caso è stato calcolato un modello 3D integrando la "nuvola di punti" iniziale e impostando una risoluzione di 2 cm (Figura 11).

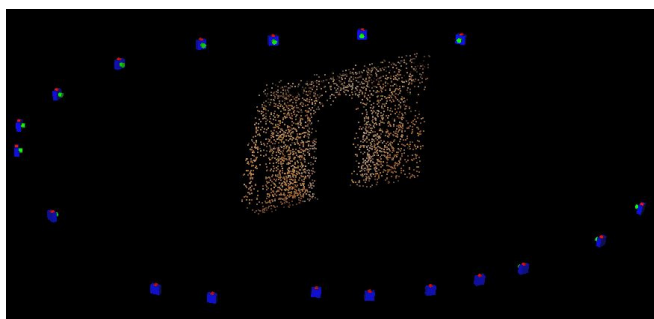


Figura 10 – Schema delle prese dell'Antefissa.

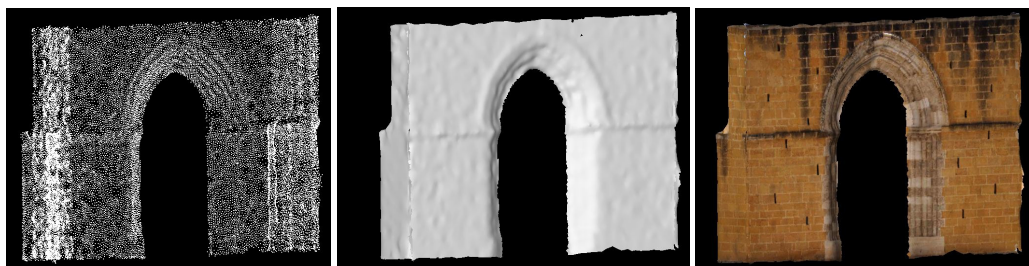


Figura 11 – Visualizzazione per punti (a sinistra), shaded (centrale) e con texture (a destra) del modello 3D del Portale della chiesa di San Giacomo.

Porta Aragonese

La Porta Aragonese è parte di ciò che resta del Castello a Mare a Palermo. Dell'esistenza di un presidio fortificato posto sull'imboccatura dell'antico porto di Palermo antecedente il X secolo, non si ha tutt'oggi certezza. Infatti, prima di tale data non si hanno fonti sicure, solo notizie pervenute attraverso ricostruzioni storiche. Grazie a queste è ipotizzabile che il Castello a Mare fosse una fortificazione di epoca araba a pianta quadrilatera con torri poligonali ai quattro angoli.

L'oggetto di studio ha dimensioni di 25,70 m x 8,50 m x 11,00 m ed è costituito da un nucleo centrale, con fornice ad arco policentrico, affiancato da due torri poligonali scarpate alla base.

Il rilievo della Porta Aragonese è stato sicuramente il più difficoltoso infatti, anche se intorno c'è un ampio spazio che consente grandi possibilità di movimento, il terreno presenta notevoli differenze di quota per l'esistenza di un ampio fossato. Tale situazione ha comportato l'esecuzione di una sequenza chiusa non molto regolare, ma con immagini riprese da quote e distanze anche molto diverse. Inoltre, a causa della diversa esposizione della Porta durante la fase di presa alcune sequenze di foto sono risultate in condizioni di illuminazione molto diverse (Figura 12).



Figura 12 – Variazioni cromatiche significative tra foto della stessa sequenza.

Questa condizione è risultata determinante per la riuscita della procedura automatica. Infatti, eseguendo delle prove utilizzando tutti i fotogrammi la procedura non riusciva a chiudere correttamente la sequenza (Figura 13), facendo ipotizzare che il blocco non potesse essere orientato in maniera automatica.

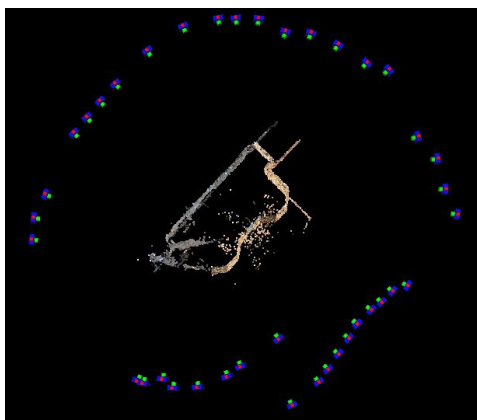


Figura 13 – Schema delle prese relative all'orientamento non corretto della Porta Aragonese.

Per ovviare ai problemi riscontrati e utilizzare comunque la procedura automatica, i fotogrammi sono stati suddivisi in quattro blocchi. Impostando la ricerca di punti omologhi in tre foto vicine, sono state caricate ed orientate automaticamente le prime otto foto. Successivamente, sono state inserite prima altre 9 foto, poi altre 20 foto e infine le rimanenti 4. In questo modo è stato possibile chiudere la sequenza (Figura 14). Infine, la modellazione della Porta Aragonese è avvenuta integrando la “nuvola di punti” ottenuta inseguito alla fase di orientamento, che presenta già una risoluzione abbastanza elevata, per definire meglio i contorni dell’oggetto (Figura 15).

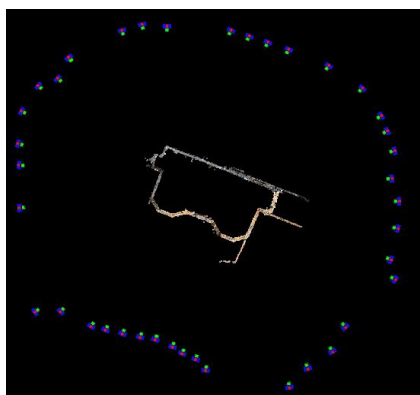


Figura 14 – Schema della sequenza della Porta Aragonese.



Figura 15 – Visualizzazione per punti (a sinistra), shaded (centrale) e con texture (a destra) del modello 3D della Porta Aragonese.

	N. max di SmartPoint	N. di immagini in sequenza da correlare	Cutoff Theshold	S.q.m. (pixel)	N. Punti	Tempo	N. Foto	Sequenza
Arula del Tempio della Vittoria	500	2	25	1.0	3808	00.03.21	24	Ordinata chiusa
Bassorilievo di Mosè	300	3	30	0.9	1155	00.00.51	12	Ordinata aperta
Antefissa a maschera gorgonica	300	1	20	0.9	2245	00.02.21	32	Ordinata aperta
Portale di S. Giacomo	250	6	35	1.0	2782	00.01.09	19	Ordinata chiusa
Porta Aragonese	500	3	30	0.9	8997	00.05.22	41	Ordinata chiusa

Tabella 2 – Parametri e risultati delle procedure di orientamento automatico dei casi studio considerati.

Conclusioni

Le procedure di orientamento automatico in fotogrammetria *close-range* rappresentano una notevole evoluzione dal punto di vista operativo soprattutto per rilievi di Beni Culturali dove è meno frequente l'impiego di target (anche codificati) per individuare punti di legame e dove il numero di immagini per descrivere e soprattutto per modellare in 3D può essere anche molto elevato.

L'integrazione tra le tecniche della *Computer Vision* e quelle fotogrammetriche si è rivelata molto utile per migliorare ed implementare software ed applicativi che riescono ad orientare blocchi di fotogrammetria terrestre anche con caratteristiche molto differenti.

La possibilità di utilizzare un software commerciale come PhotoModeler Scanner 2011 rende tale approccio facilmente utilizzabile anche ad utenti non esperti.

I risultati conseguiti hanno sostanzialmente confermato le potenzialità delle procedure automatiche utilizzate; in tutti i casi considerati i residui complessivi (rappresentati dalla s.q.m. su migliaia di punti omologhi) sono risultati pari a circa 1 pixel. Tale valore potrebbe essere considerato leggermente superiore o analogo a quanto normalmente si ottiene con orientamenti manuali senza l'ausilio di target; un confronto tra i due differenti approcci sarà prossimamente svolto per valutare proprio questi aspetti.

La ricerca ha evidenziato comunque alcuni punti critici dovuti soprattutto a problemi legati alle caratteristiche delle immagini e alla conformazione del blocco. Infatti, in diversi casi è stato necessario "aiutare" il processo automatico tramite l'inserimento di ulteriori immagini o tramite la suddivisione della sequenza di immagini in sotto blocchi di dimensioni ridotte per consentire il calcolo dei parametri di orientamento esterno corretti. Inoltre la scelta dei parametri di calcolo utilizzati in PhotoModeler Scanner per la ricerca dei punti omologhi non va sottovalutata in quanto potrebbe influenzare in maniera decisiva la risoluzione del calcolo. Unico aspetto negativo da sottolineare è la mancanza di strumenti di controllo adeguati per le verifiche sugli orientamenti.

Ringraziamenti

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

Barazzetti L., Scaioni M. (2010), "Dalle immagini dell'oggetto alla replica fisica in modalità automatica", *Atti 14ª Conferenza Nazionale ASITA*, Brescia, 9-12 novembre 2011, 149-154.

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

Barazzetti L., Remondino F., Scaioni M. (2011a), "Automated and accurate orientation of complex image sequences", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-5/W16, Trento, 2-5 Marzo 2011, 8 pp., su CD-ROM.

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.

Del Pizzo S., Troisi S. (2011), "Automatic orientation of image sequences in cultural heritage", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-5/W16, Trento, 2-5 Marzo 2011, 8 pp.

Lowe D. (2004), "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91-110.

Remondino F., El-Hakim S. (2006), "Image-based 3D modelling: a review", *Photogrammetric Record*, 21(115): 269-291.

Roncella R., Re C., Forlani G. (2011), "Performance evaluation of a structure and motion strategy in Architecture and cultural heritage", *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-5/W16, Trento, 2-5 Marzo 2011, 8 pp.