

**Mirco Cannella**

Architetto. Dottore di Ricerca in Scienze del Rilievo e della Rappresentazione. Assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Palermo, si occupa di rilievo con nuove tecnologie informatiche, fotogrammetria digitale, e nuove metodologie di rappresentazione digitale per l'analisi e la fruizione dei beni culturali architettonici.

## Valutazioni sull'impiego della fotogrammetria sferica nella costruzione di modelli digitali 3D: l'oratorio della chiesa di Santa Caterina a Zejtun (Malta)

### *Ratings on the use of the spherical photogrammetry for the 3D-models construction: the Oratory of St. Catherine's Parish Church in Zejtun (Malta)*

*L'utilizzo di immagini sferiche per la documentazione dell'architettura è una realtà ormai da tempo consolidata, tuttavia solo di recente si assiste all'implementazione di procedure e allo sviluppo di software per l'estrazione di informazioni metriche da manufatti architettonici.*

*Il presente contributo indaga l'efficacia e le potenzialità d'impiego delle immagini sferiche nella fotogrammetria digitale per la costruzione di modelli 3D attraverso tecniche di image-based 3D modeling utilizzando dati metrici acquisiti nell'ambito di uno studio su manufatti in pietra da taglio maltesi realizzati tra il XVI e XVIII secolo. Nello specifico si descrivono le procedure di modellazione e comparazione di informazioni metriche degli spazi interni dell'oratorio del Santissimo Sacramento annesso alla chiesa di Santa Caterina a Zejtun.*

*The use of spherical images for the documentation of architecture is a long-established reality, but only recently we are witnessing the implementation of procedures and the development of software to extract metric information from architectural buildings.*

*This paper investigates the helpfulness and the potential to use spherical images in digital photogrammetry for 3D-models construction through the techniques of image-based 3D modeling. The used metric data are acquired as part of a study of some stone-cut buildings made in Malta between the sixteenth and eighteenth centuries. Specifically, we describe the methodologies of modeling and comparison of metric information regarding the interior spaces of the Oratory of the Blessed Sacrament annexed to St. Catherine's Parish Church in Zejtun.*

**parole chiave:** Fotomodellazione, panorami sferici, beni culturali.

**keywords:** Image-based modeling, multi-image spherical panoramas, cultural heritage.

Le più recenti ricerche nell'ambito della fotogrammetria digitale e della Computer Vision sono incentrate sullo sviluppo di algoritmi, tecniche e procedure di orientamento ed estrazione di features, nuvole di punti e in generale informazioni metriche utilizzando coppie o più panorami.

Le immagini sferiche sono generate da prese fotografiche effettuate a 360° da un unico centro detto punto nodale ovvero centro ottico dell'obiettivo.

La forma più comune e diffusa in cui si presenta un panorama sferico è costituita da un applicativo di realtà virtuale che permette di visualizzarlo facendo roteare il punto di vista di 360°. In ambito fotogrammetrico, invece, la tipologia maggiormente adoperata è quella del panorama equirettangolare, un particolare tipo di rappresentazione che consente di sviluppare sul piano l'immagine della sfera attraverso la trasformazione di longitudine e latitudine in coordinate planari orizzontali e verticali; così facendo i poli della sfera saranno rappresentati da due linee rette e parallele di lunghezza pari alla circonferenza.

Nella fotogrammetria piana la posizione spaziale di un punto può essere ricavata se è visibile da almeno due distinti fotogrammi e sono noti sia i parametri di orientamento interno della fotocamera (distanza punto principale, dimensione fotogramma, parametri di distorsioni etc.) che quelli di orientamento esterno relativi e assoluti (posizione relativa dei fotogrammi, scalatura e orientamento assoluto del modello).

In maniera del tutto analoga è possibile estrarre dalle informazioni metriche da due o più panorami equirettangolari in seguito a mirate operazioni di orientamento e l'utilizzo di specifiche equazioni di collinearità [1]; le ricerche odierne si incentrano sullo sviluppo di processi automatici di riconoscimento di punti omologhi e matching per la generazione di nuvole di punti sfruttando e modificando opportunamente procedure già consolidate con l'utilizzo d'immagini planari [2].

L'approccio alla fotomodellazione qui proposto si distacca dalle tendenze attuali di generazione automatica di mesh, presentando un processo di discretizzazione e costruzione di superfici 3D che ha come fine l'analisi delle matrici geometriche

di manufatti architettonici. Nel caso specifico le procedure descritte interessano la costruzione di un modello 3D dell'oratorio maltese del Santissimo Sacramento annesso alla chiesa parrocchiale di Santa Caterina a Zejtun [3].

L'oratorio, costruito a partire dal 1743, si costituisce come un'opera di stereotomia tra le più rappresentative presenti nel territorio maltese. A pianta rettangolare è coperto da una volta a botte scandita da lunette finestrate. Le alte pareti sono intervallate da paraste e marcate da imponenti cornici orizzontali. Sulla parete di fondo, in direzione est, si apre una grande abside mentre la parete contrapposta, ad ovest, è conclusa in sommità da una superficie torica che funge da raccordo con la volta. Piccole aperture agli angoli collegano l'oratorio agli alti ambienti della chiesa tra cui una cripta che si sviluppa al di sotto dello stesso oratorio; sulla parete ovest un grande arco segna l'ingresso principale mentre ulteriori aperture, poste ad una quota intermedia, svelano dei vani nascosti (i cantoria), raggiungibili da un sistema di corridoi e caracol de mallorca [4].

Al fine di comparare dati metrici desunti da differenti metodologie di rilievo, lo spazio interno dell'oratorio è stato oggetto di acquisizioni sia fotografiche, per la generazione di panorami sferici, sia laser scanning; mire (target) sono state predisposte e impiegate per l'orientamento delle scansioni e dei panorami sferici nonché come punti di riferimento di verifica e controllo metrico.

Per il rilievo laser scanning è stato utilizzato uno strumento a modulazione di fase Leica HDS 7000; sfruttando la compensazione biassiale, le scansioni sono state eseguite da due distinti punti di stazione utilizzando una risoluzione tale da ottenere, tra i punti acquisiti, una distanza media di 3 mm.

Gli scatti fotografici sono stati acquisiti con una camera DSLR dotata di un obiettivo 15 mm F2.8 diagonal fisheye e sensore CMOS a pieno formato da 21,1 megapixel. La camera è stata collegata a un treppiede fotografico per mezzo di una testa panoramica Nodal Ninja 3 predisposta con elementi di fissaggio di riferimento, precedentemente stabiliti in laboratorio, per agevolare l'individuazione del centro nodale dell'obiettivo.

Da ogni punto di ripresa sono stati acquisiti sette scatti; sei intervallati da un angolo azimutale di 60° mentre il settimo è stato ottenuto inclinando verso l'alto la camera di un angolo zenitale pari a circa 90°. Grazie all'utilizzo di un'ottica fisheye, gli intervalli di acquisizione delle foto, consentono di avere tra uno scatto e l'altro una buona zona di sovrapposizione necessaria per le operazioni di stitching.

Da ogni set di scatti si ricava un panorama equirettangolare da 98 megapixel (14000 x 7000 pixel) elaborato mediante il software di photo stitching PtGui con processi automatici di individuazione di punti di omologhi (control points) tra gli scatti e l'inserimento manuale di altri punti con la possibilità di verificare eventuali errori. La fusione dei singoli scatti e l'omogeneizzazione dell'esposizione avvengono attraverso algoritmi di blending che permettono di ottenere una singola immagine in cui le zone di sovrapposizione sono dissimulate.

Le informazioni metriche sono state desunte utilizzando il software della Autodesk ImageModeler, programma che consente di realizzare modelli 3D sia da immagini fotografiche digitali canoniche sia da panorami equirettangolari visualizzabili e navigabili in maniera analoga all'applicativo QTVR[5]. Importati i panorami equirettangolari si procede all'orientamento relativo definito con l'individuazione di almeno otto punti omologhi; per affinare il processo di orientamento è necessario aumentare il numero dei punti o introdurre dei vincoli metrici e geometrici: ad esempio è possibile assegnare coordinate specifiche a punti noti misurati topograficamente o imporre l'ortogonalità a due spigoli o direzioni incidenti caratteristici del manufatto architettonico. L'orientamento assoluto è definito da un sistema di coordinate scelto in funzione della morfologia e geometria dello spazio oggetto del rilievo, mentre la messa in scala del modello si ottiene attribuendo alla distanza tra due punti una misura nota.

L'utilizzo delle immagini panoramiche in ImageModeler ha molteplici vantaggi: le procedure di calibrazione e orientamento sono poco onerose sia dal punto di vista computazionale che in



1. Interno dell'oratorio del Santissimo Sacramento (Zejtun, Malta). Riprese fotografiche e panorama equirettangolare.



termini di tempo impiegato; la visione a 360°, da più punti di vista, consente un controllo ottimale dello spazio da rappresentare; è possibile, inoltre, integrare i panorami con foto di dettaglio per la misura e modellazione di eventuali particolari architettonici.

Le prime verifiche metriche sono state finalizzate alla comparazione fra le distanze mutue di punti omologhi definiti dai target predisposti; dall'analisi dei dati ne consegue che lo scarto tra le distanze tra i target misurati sui panorami sferici e quelli misurati sulle nuvole di punti non supera i 4 mm. Per il confronto di coordinate di punti naturali (spigoli, macchie sulle murature ecc.) è stato necessario imporre un orientamento assoluto alle nuvole di punti coerente a quello definito nel progetto fotogrammetrico, pertanto le coordina-

te fotogrammetriche dei target sono state utilizzate per orientare le scansioni laser. Anche in questo caso si è potuto constatare uno scarto tra le coordinate di target corrispondenti inferiore ai tre millimetri.

I primi dati ottenuti dimostrano che da due o più panorami in Imagemodeler si ottiene un sistema fotogrammetrico perfettamente misurabile dal quale è possibile estrarre misure lineari o coordinate di singoli punti con un'affidabilità metrica più che accettabile.

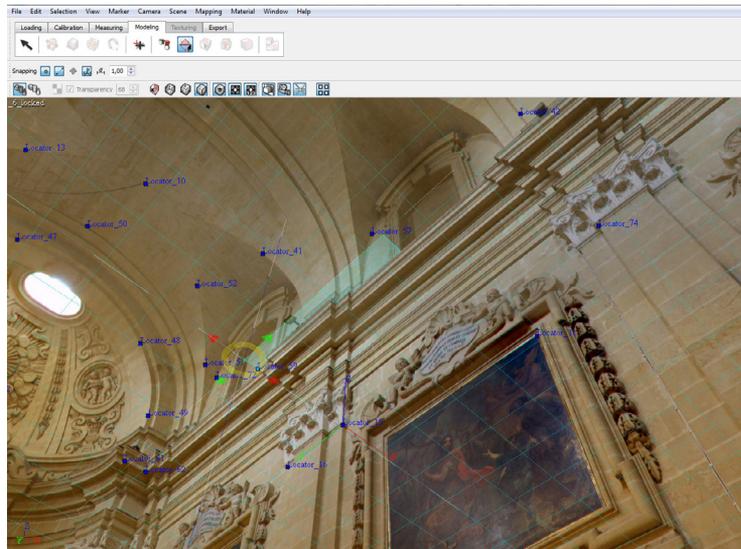
Il software Imagemodeler è fornito di alcuni strumenti di base per la creazione e modifica di superfici, che tuttavia si rivelano poco precisi e di non immediato utilizzo. L'approccio tipico alla modellazione si basa, infatti, sulla costruzione di poligoni e la trasformazione di primitive di base

(cubo, sfera, cilindro etc.) operando estrusioni di facce e manipolazione di vertici e spigoli, ma sono assenti una serie di tools utili alla modellazione (ad esempio sono assenti strumenti per l'estruzione di curve lungo binari o rivoluzioni attorno ad un asse e altri strumenti caratteristici dei software CAD e NURBS). Per tale ragione nella costruzione del modello 3D dell'oratorio si è scelto di utilizzare congiuntamente le informazioni metriche e geometriche ricavate con Imagemodeler e il software di modellazione 3D Rhinoceros.

A titolo esemplificativo vengono qui descritte alcune delle procedure impiegate per la costruzione di un modello 3D dell'oratorio.

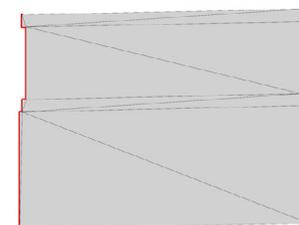
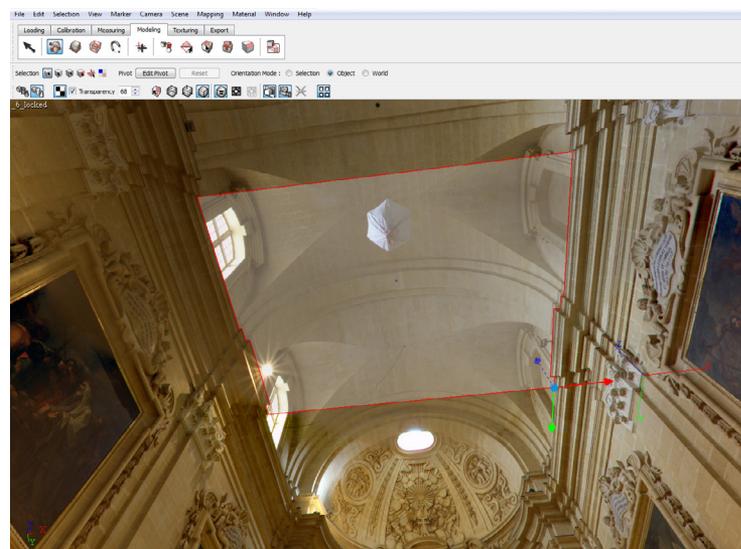
Utilizzando Imagemodeler il perimetro interno è stato ricavato sulla base di elementi architettonici ad andamento orizzontale, nello specifico il bordo superiore di una delle cornici ornamentali che corrono lungo le pareti.

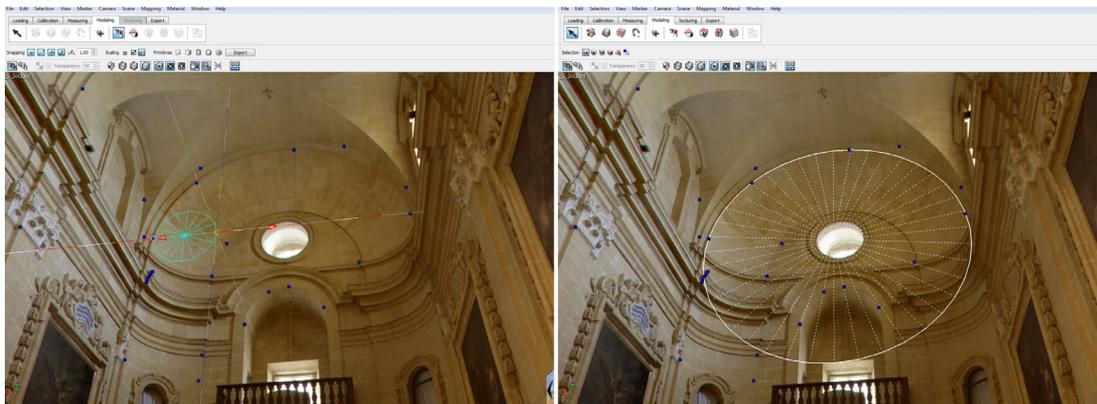
A tal fine è stato necessario anzitutto materializzare e definire la posizione spaziale di almeno un punto appartenente al bordo superiore della cornice visibile da due o più panorami sferici; il punto, così localizzato, consente di imporre un piano di costruzione, orizzontale e alla medesima quota, sul quale è costruito un poligono i cui lati sono definiti ridisegnando il bordo della cornice e seguendone il percorso direttamente sulle immagini sferiche. Il poligono così realizzato è usato per l'estrazione del perimetro in Rhinoceros, e la polilinea ottenuta, eventualmente reinterpretata e ridisegnata, diviene il binario per l'estruzione lineare per la modellazione della cornice. Per la modellazione della superficie torica presente sulla parete est dell'oratorio, dopo aver materializzato alcuni punti sul bordo più esterno, è stato costruito un cerchio passante per almeno tre dei punti individuati; in maniera analoga è stato ricavato un ulteriore cerchio, ortogonale al primo, per definire il profilo della curva di sezione. Queste geometrie sono state rielaborate in Rhinoceros ridisegnandone i profili e costruendo la superficie come sweep a un binario. I singoli elementi architettonici modellati in ambiente NURBS sono stati a loro volta convertiti in superfici poligonali e reimportati in Imagemodeler per essere texturizzati; è possibile, infatti, proiettare



2. Imagemodeler: definizione del piano di riferimento orizzontale e costruzione della superficie poligonale

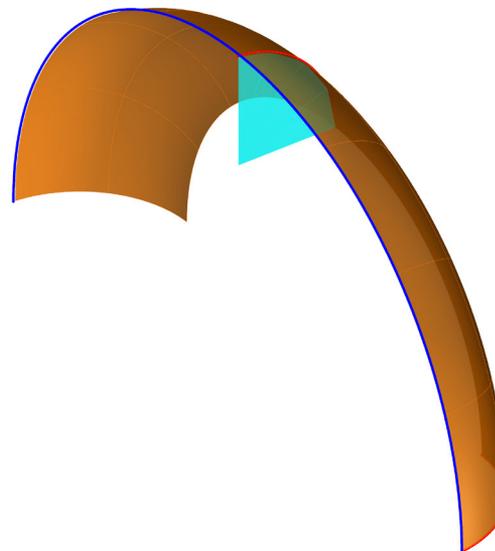
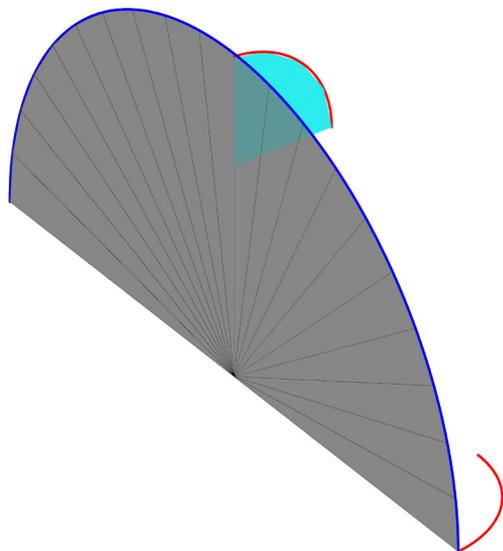
3. Ridisegno del profilo superiore della cornice ed estrazione delle curve di bordo.





3. Costruzione del cerchio di riferimento per la modellazione della superficie torica.

4. Estrazione delle curve di bordo e costruzione della superficie.



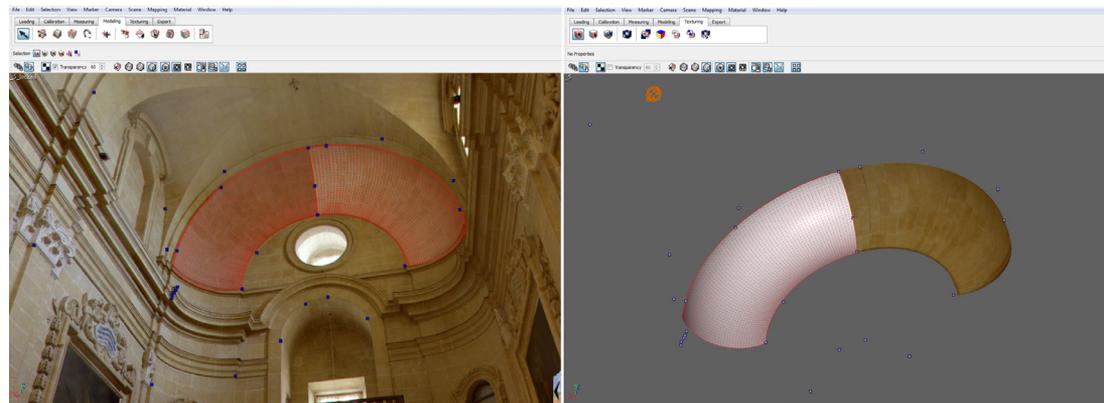
sulle superfici, con processi automatici di estrazione delle texture, la porzione di immagine corrispondente estratta da un singolo o più panorami. Qualora si utilizzino più immagini per la mappatura, il software provvede ad ottimizzare la texture finale con fusione graduale di più immagini. Questa procedura consente di texturizzare il modello 3D in maniera molto veloce, garantendo inoltre un'ottima corrispondenza tra la geometria delle superfici e la corrispettiva texture. Ma quali sono gli errori indotti da una modellazione effettuata con i suddetti criteri? Gli inevitabili errori rientrano nelle tolleranze accettabili richieste dal progetto di ricerca in atto?

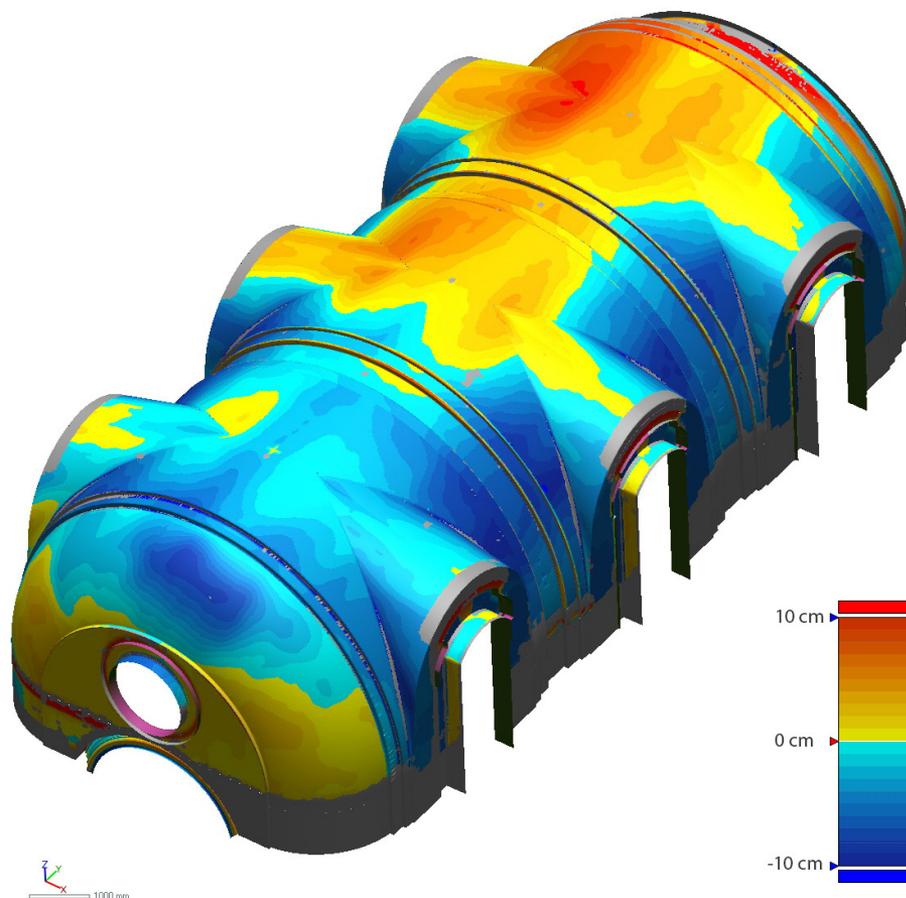
Va detto che l'approccio metodologico utilizzato nell'ambito delle ricerche sui manufatti maltesi è volto principalmente all'analisi delle matrici geometriche che caratterizzano le architetture studiate senza trascurare l'aspetto metrico, proporzionale e materico del manufatto.

Sebbene, come si è detto, l'estrazione di coordinate di singoli punti da un progetto fotogrammetrico basato su più immagini sferiche risulta essere uno strumento di misurazione piuttosto affidabile, non è da sottovalutare, per la produzione di un modello accurato, l'importanza della sensibilità e dell'esperienza dell'operatore. Un errato matching di punti omologhi tra diverse immagini può generare errori non indifferenti così come una non corretta lettura delle geometrie può condurre ad una errata interpretazione e costruzione delle forme. Inoltre, la costruzione di un modello 3D prevede sempre un processo di discretizzazione che, come in questa occasione, può non tener conto di eventuali deformazioni strutturali o difetti di costruzioni del manufatto architettonico.

La lettura dello scarto tra le superfici del modello 3D realizzato e le scansioni laser permette di ottenere un dato sul quale è possibile effettuare delle considerazioni.

Ad esempio, se si osserva lo scarto tra il modello 3D della volta a botte lunettata dell'oratorio e la superficie mesh generata in modo automatica dalle nuvole di punti, scarto che è possibile mettere in luce attraverso una mappa cromatica generata con il software Inus Rapidform XOS,





[nella pagina precedente]

6. Texturizzazione del modello in Imagemodeler.

7. Sezioni trasversale e longitudinale del modello 3D texturizzato.

[nella pagina]

8. Mappa cromatica dello scarto tra il modello 3D della volta e la superficie mesh generata da nuvole di punti.

emerge che circa il 60% della superficie analizzata ha uno scostamento variabile da 0 a 3 centimetri dalla superficie di riferimento.

In alcune aree della volta, quelle in prossimità dei fianchi o dell'intersezione con la lunetta, si nota uno scostamento ancora maggiore attribuibile a una discontinuità superficiale localizzata trascurata dal processo di discretizzazione delle superfici.

Lo studio proposto ha permesso di valutare pregi, difetti e potenzialità della fotogrammetria sferica che trova il suo ottimale utilizzo principalmente per il rilievo di spazi architettonici interni. Il basso costo delle attrezzature necessarie, la facile trasportabilità, il numero ridotto di prese fotografiche necessarie per la realizzazione dei panorami sferici e i ridotti tempi di elaborazione dei dati fanno di questa metodologia un'ottima alterna-

tiva ai classici metodi di rilievo per lo studio e l'analisi dell'architettura. Le procedure qui esposte costituiscono pertanto una soluzione efficace per la documentazione e la rappresentazione dei manufatti architettonici sebbene ad oggi, l'esigua presenza sul mercato di software destinati al trattamento metrico dei panorami sferici e lo scarso aggiornamento di quelli esistenti ne limiti fortemente l'impiego e la diffusione.

**NOTE**

[1] Barazzetti, Luigi; Fangi, Gabriele; Remondino, Fabio; Scaioni, Marco (2010) Automation in Multi-Image Spherical photogrammetry for 3D Architectural Reconstructions, in The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST.

[2] Pagani, Alain; Gava, Christiano; Cui, Yan; Krolla, Bernd; Hengen, Jean-Marc; Stricker, Didier (2011) Dense 3D point cloud generation from multiple high-resolution spherical images, in The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST.

[3] I rilievi a Malta sono stati condotti nell'ambito delle attività del progetto denominato "LITHOS – Centro studi sulla stereotomia nel mediterraneo". [www.progetto-lithos.eu](http://www.progetto-lithos.eu)

[4] Rev Abela, Joe (2006), The Parish of Zejtun through the ages. Midsea Books, Santa Venera (Malta).

[5] De Luca, Livio (2011), La Fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie, Flaccovio Editore, Palermo.