

### Mirco Cannella

Architetto e dottore di ricerca in Scienze del Rilievo e della Rappresentazione Architettonica. Attualmente è titolare di un assegno di ricerca presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Palermo. La sua attività di ricerca è incentrata sull'interpretazione e rappresentazione digitale 3D di manufatti architettonici rilevati con strumentazioni a scansione laser e con metodi fotogrammetrici.

## Sviluppo e rappresentazione digitale di superfici architettoniche complesse per la documentazione e il restauro

### *Digital Unwrapping ed visualization of complex architectural surfaces for the documentation and the restoration*

Questa ricerca presenta la metodologia che è stata utilizzata nella rappresentazione delle colonne del Tempio C nel parco archeologico di Selinunte (TP). Tale metodologia – basata sull'impiego di superfici matematiche ausiliarie e *tools* di modellazione NURBS – ha permesso di sviluppare sul piano le superfici mesh di modelli 3D texturizzati realizzati da dati acquisiti con tecniche di rilevamento integrate (laser scanning e fotogrammetrie).

Da questi sviluppi è stato possibile realizzare ortofoto che documentano in maniera efficace la superficie tronco-conica e torica dei fusti e degli echini delle colonne, fornendo in tal modo una soluzione alla necessità, da parte dei progettisti del restauro, di disporre di elaborati grafici su cui individuare, mappare e quantificare le aree oggetto di degrado di superfici curve complesse.

*This research explains the methodology applied to the representation of the column shafts and capitals of the Temple C in the Selinunte Archaeological Site.*

*Using mathematical auxiliary surfaces and NURBS modelling tools, textured highly-detailed meshes, produced with photogrammetry and laser scanner 3D data, was unwrapped onto a reference plane.*

*The purpose of this unwrapping is to realize orthoimages that accurately describe the conic and toric surfaces of column shafts and echinus.*

*Methodology gives a solution to the restoration and conservation specialists offering drawings on which to detect, map and quantify in these the damaged areas on complex curved surfaces.*

**Parole chiave:** *sviluppo, modelli poligonali, fotogrammetria, laser scanning.*

**Keywords:** *unwrapping, polygonal models, photogrammetry, laser scanning.*



Fig. 1 Vista del peristilio Nord del Tempio C di Selinunte (TP).

Le colonne oggetto di studio fanno parte del peristilio nord del tempio, e sono le uniche a essere state ricomposte per anastilosi nei primi decenni del secolo scorso. Durante i lavori di restauro si scelse di utilizzare barre metalliche annegate nel calcestruzzo per ricostituire parti mancanti o erose, ma tale scelta si rivelò negli anni nefasta, in quanto l'ossidazione del metallo ha provocato notevoli lesioni e il distacco di un consistente volume di materiale lapideo; oltre a ciò, il forte vento che spira nel territorio di Selinunte ha accelerato il processo di alveolizzazione della superficie delle colonne, lasciate per anni in balia degli agenti atmosferici senza un'adeguata protezione. La complessa morfologia che contraddistingue le colonne del tempio dorico, unita al forte degrado delle superfici, non consentiva l'utilizzo delle più note e collaudate tecniche di produzione di fotopiani e ortofoto. È stato necessario quindi studiare differenti procedure di rilievo e rappresentazione che prevedessero la costruzione di modelli

3D, mappati con *texture* ad alta risoluzione, e lo sviluppo delle loro superfici.

I modelli 3D delle singole colonne sono stati elaborati a partire da dati acquisiti con due metodologie di rilevamento: quella *laser scanning*, per l'acquisizione metrica finalizzata alla produzione dei modelli di superfici *mesh* [1], e quella fotogrammetrica, per la costruzione delle *texture*, ad alta risoluzione, da associare ai modelli.

Sebbene sia noto come le sole tecniche di fotogrammetria digitale, spesso, siano sufficienti a elaborare dei modelli metricamente accurati, nel caso specifico l'utilizzo integrato delle due suddette metodologie è stato imposto dall'impossibilità di acquisire un numero adeguato di prese fotografiche delle zone superiori del peristilio per la generazione di nuvole di punti dense e la costruzione dei modelli metricamente accurati. Le asperità del sito non permettevano, infatti, di utilizzare ponteggi mobili, e neppure il ricorso a droni si è rivelato plausibile, dato il forte vento che

imperversa in maniera pressoché costante nella zona durante l'intero arco della giornata.

L'impossibilità di raggiungere con mezzi ausiliari le aree più alte del colonnato è stata superata utilizzando come piattaforma artificiale i ruderi delle mura della cella del Tempio C e gli alti cumuli di blocchi lapidei e rocchi del limitrofo Tempio D. Questo espediente ha consentito di eseguire numerose scansioni laser da distinti punti di stazione e a quote differenti, assicurando così una quasi totale campionatura delle superfici, e di scattare le foto necessarie per il *texturing* delle zone più alte del peristilio.

L'impossibilità di avvicinarsi fisicamente alle colonne ha richiesto l'utilizzo, per le prese fotografiche, di tre differenti ottiche a focale fissa montate su un corpo macchina di tipo reflex dotato di un sensore da 21 milioni di pixel *full frame*:

1. Un grandangolare con lunghezza focale di 28mm, impiegato per le riprese dei primi rocchi eseguite a livello del crepidoma e del suolo;



Fig. 2 Set di prese fotografiche utilizzate per l'elaborazione fotogrammetrica di una delle colonne. In alto le foto generali del peristilio; evidenziate in rosso le foto di dettaglio della colonna.

2. Un obiettivo con lunghezza focale di 50mm, utilizzato per la zona centrale del fusto con scatti eseguiti da media distanza;
3. Un teleobiettivo da 135mm, impiegato per fotografare le aree terminali dei fusti e i capitelli dalle su citate piattaforme, che si trovano a una distanza compresa tra i 15 e i 20 metri.

Le prese fotografiche sono state eseguite, inoltre, sfruttando una propizia copertura nuvolosa del cielo: infatti, la luce naturale e in particolare la componente solare diretta, oltre a provocare problematiche di *lens flare* e perdita di dettaglio negli scatti controluce, avrebbe determinato una disomogeneità cromatica sulla superficie delle colonne e accentuate ombre in corrispondenza delle scanalature e lacune.

La strategia adottata per l'esecuzione delle prese fotografiche è stata studiata per sfruttare al meglio sia i tempi di acquisizione sia quelli di elaborazione. Per il processo di orientamento assoluto e scalatura dei singoli progetti fotogrammetrici si

è provveduto ad acquisire, con un'ottica grandangolare, un primo set di foto del colonnato nel suo complesso e, solo in seguito, sono stati acquisiti i singoli set di foto di ogni colonna. Elaborando di volta in volta differenti progetti fotogrammetrici, ciascuno dei quali comprendente il set di foto del peristilio e quello della colonna in esame, è stato possibile ottimizzare le risorse hardware dei calcolatori; inoltre, ciò ha reso possibile semplificare il processo di orientamento dei singoli progetti grazie all'utilizzo del medesimo gruppo di punti omologhi distribuito sul peristilio.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei progetti fotogrammetrici, si è optato per l'utilizzo combinato dei software *open source* VisualSFM [2], SfM GeoRef [3], e MeshLab. Il software VisualSFM è stato impiegato per l'orientamento relativo dei fotogrammi [4] mentre quello assoluto è stato eseguito avvalendosi del software SfM GeoRef che consente di individuare e contrassegnare dei punti noti sui fotogrammi e assegnare a essi le

relative coordinate. Solo successivamente, il software provvede a riscrivere il progetto elaborato in VisualSFM e ad assegnare nuovi parametri di orientamento alle camere [5]. Questo nuovo progetto, scalato e orientato secondo un unico sistema di riferimento comune ai dati laser e dunque ai modelli 3D delle singole colonne, è stato importato in MeshLab per la texturizzazione dei modelli [6].

La scelta, già accennata, di elaborare *a priori* set fotografici precedentemente definiti, (della singola colonna e del peristilio) si rivela, in questa fase, di fondamentale importanza: l'uso di un maggiore numero di fotogrammi avrebbe infatti richiesto, da parte del software in questione, un consumo notevole di memoria RAM tale da incidere le prestazioni del calcolatore. Tale scelta, inoltre, semplifica la gestione, l'organizzazione e la selezione delle immagini realmente necessarie per il processo di texturizzazione scartando, come nel caso in esame, le foto generali del

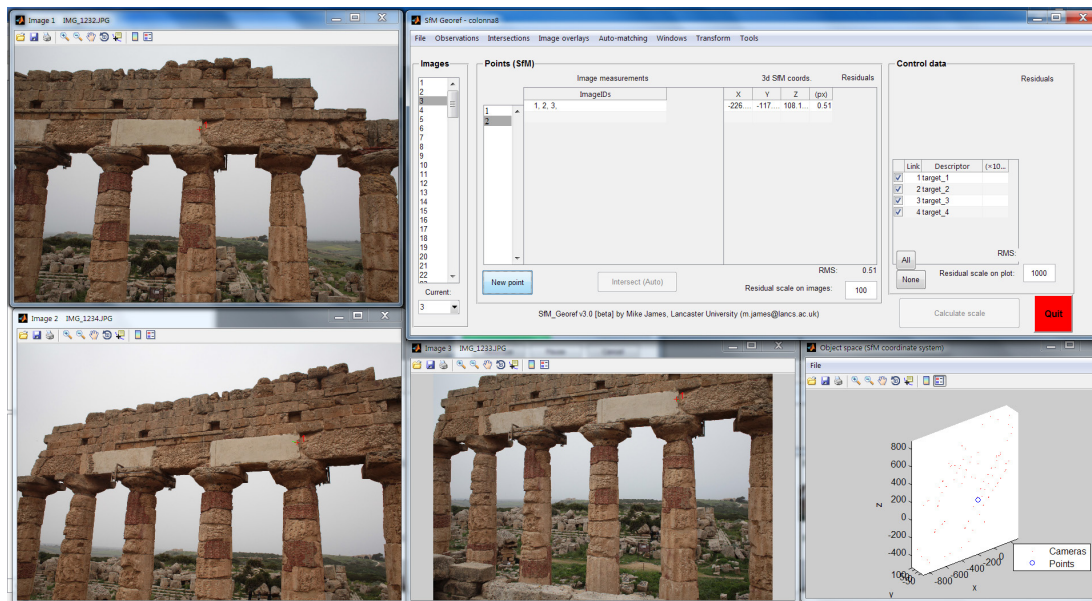
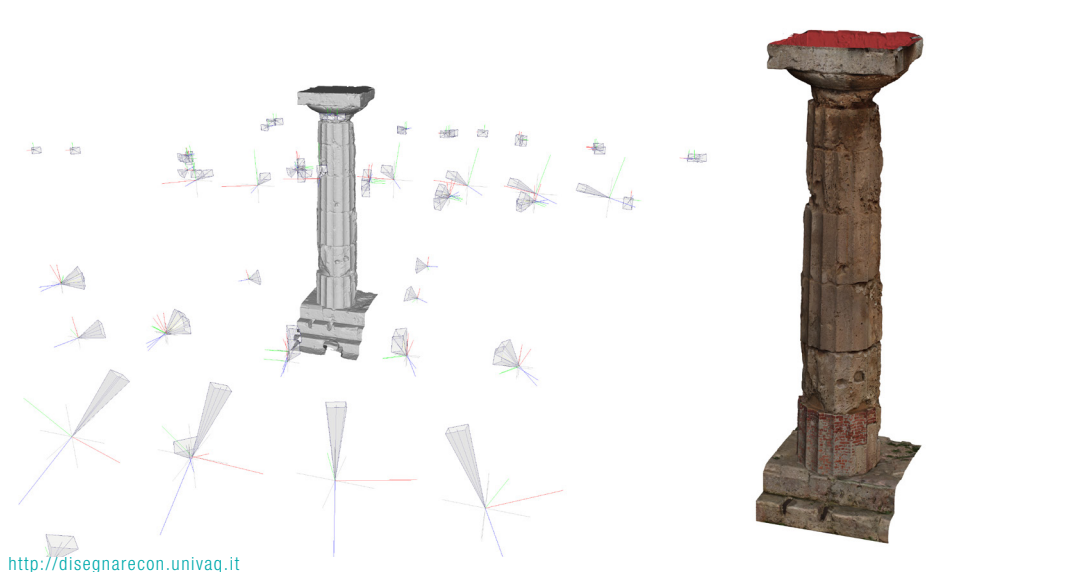


Fig. 3 Interfaccia grafica del software SfM GeoRef.

Fig. 4 Processo di texturizzazione in MeshLab.



colonnato impiegate solo per l'orientamento. MeshLab consente di visualizzare graficamente l'orientamento e la disposizione delle singole camere nello spazio e di proiettare sul modello 3D le immagini *raster* attraverso il *tools* "parameterization + texturing from registered raster". Questo comando consente di controllare il processo di proiezione attraverso l'inserimento di valori predefiniti e la selezione di una vasta gamma di parametri: è possibile, ad esempio, settare la risoluzione finale della *texture*, o scegliere se eseguire la *blending* tra le immagini proiettate o, ancora, stabilire se l'algoritmo che determina la scelta dell'immagine da proiettare debba essere influenzato dal fattore distanza (come avviene quando si dispone di più fotogrammi che riprendono la medesima area ma da punti e distanze differenti). Nel caso specifico i tempi di calcolo per la proiezione di ogni set di foto sul modello corrispondente si è attestato in media sui 40 minuti.

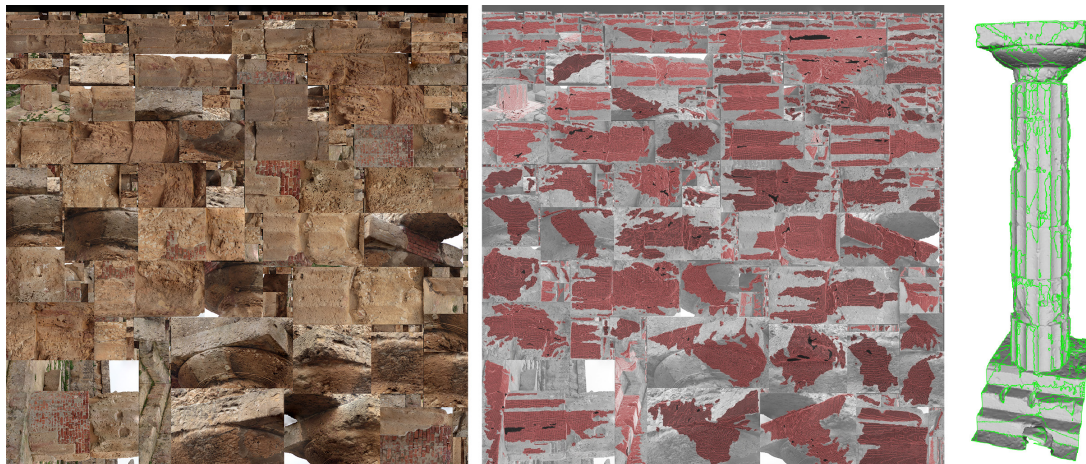


Fig. 5 A sinistra esempio di *texture* generata; al centro indicazione delle aree della *texture* utilizzate per la mappatura; a destra, il modello della colonna con indicazione delle *seams*.

Alla fine di questo processo il software produce un'unica *texture* composta – una sorta di mosaico costituito da frammenti di immagini estrapolate dagli scatti fotografici utilizzati – e una suddivisione della superficie del modello attraverso le cosiddette *seams* (cuciture), che individuano delle aree sulla *mesh* su cui saranno proiettate specifiche porzioni della *texture* generata.

La possibilità di integrare dati di natura diversa, metrici e cromatici, acquisiti con strumenti e metodologie differenti, offre senza ombra di dubbio la possibilità di elaborare modelli 3D che documentano in maniera accurata il manufatto rilevato; tuttavia il procedimento di integrazione dei dati non è esente, come in tutti i processi di rilievo e rappresentazione, da un certo grado di errore. Nel caso in esame, gli errori dovuti all'orientamento relativo e assoluto dei fotogrammi e l'ottimizzazione dei modelli *mesh* hanno generato scarti, tra l'allineamento del modello e la *texture*, del tutto trascurabili e comunque valutabili sem-

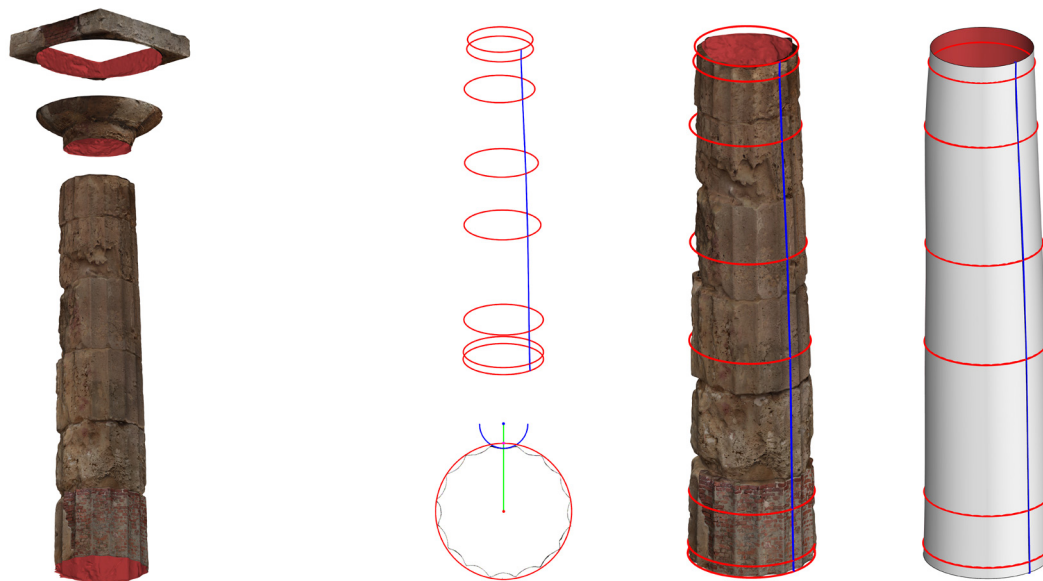
pre al di sotto del centimetro. Definita la procedura di elaborazione dei modelli 3D texturizzati si poneva il problema della loro rappresentazione attraverso elaborati grafici atti a garantire una rappresentazione bidimensionale delle superfici del fusto e del capitello delle colonne. Nei casi più comuni la documentazione attraverso viste ortografiche renderizzate di un modello tridimensionale texturizzato può risultare più che idonea a fornire una rappresentazione del bene architettonico o archeologico metricamente accurata e ricca di informazioni cromatiche. Nel caso delle colonne, tuttavia, si rendeva necessario adottare una procedura differente e più complessa.

Il semplice utilizzo di proiezioni non consentiva di documentare senza soluzione di continuità e in vera forma la superficie tronco-conica del fusto e quella torica dell'echino; occorreva piuttosto, in maniera preventiva, eseguire lo sviluppo di tali superfici. Per giungere a questa soluzione era indispensabile affrontare e sciogliere due pro-

blematiche di ordine diverso ma strettamente connesse, quali lo sviluppo sul piano di superfici *mesh* così complesse e, una volta fatto questo, il rispetto di una congrua corrispondenza tra esse e le *texture* associate.

Si è proceduto quindi a una prima suddivisione semantica del modello nei suoi elementi costitutivi di fusto, echino e abaco e al successivo sviluppo di ciascuno di essi, utilizzando il software Rhinoceros della McNeel che, com'è risaputo, è un ottimo modellatore NURBS. La scelta di Rhinoceros (nonostante il limitato numero di *tools* a disposizione per la gestione, il controllo e la modifica delle superfici *mesh*) si è rivelata la migliore poiché offre, a differenza di altri specifici software per la gestione *mesh* – come ad esempio Rapidform e Geomegic della 3DSystems e MeshLab – tutti gli strumenti utili a eseguire le operazioni di sviluppo delle superfici.

Per lo sviluppo delle *mesh* del fusto della colonna si è fatto ricorso a una superficie NURBS

Fig. 6 Suddivisione del modello *mesh*.Fig. 7 Individuazione delle curve di sezione per la costruzione della superficie ausiliaria per interpolazione di tipo *loft*. In basso a sinistra, individuazione del punto di giunzione.

ausiliare associata a essa, tangente al fusto della colonna, e costruita per interpolazione di tipo *loft* di più circonferenze tracciate da sezioni orizzontali distribuite lungo l'asse verticale del fusto. La costruzione di tale superficie ha imposto preliminarmente la regolazione dei punti di giunzione (definizione della "linea di disgiunzione"), posti all'intersezione tra le circonferenze, individuate in precedenza, e rette complanari passanti per il loro centro e il centro dell'arco di circonferenza che descrive il profilo dalla scanalatura rivolta verso il bordo esterno del crepidoma alla quota correlata.

La superficie NURBS così "costruita" approssima la conformazione del fusto della colonna caratterizzato dalla rastremazione, dall'*entasis* e dal fuori piombo di cui sono affetti, e per tale ragione le superfici non possono essere sviluppate secondo una procedura geometrica rigorosa. Rhinoceros consente lo sviluppo di tali superfici attraverso uno specifico *tools*, in grado oltre a ciò di calco-

lare e descrivere la lieve riduzione o l'aumento dell'area intervenuti a seguito dello sviluppo. Nel caso specifico il valore medio ha evidenziato una riduzione dell'area e si è attestato sempre al di sotto del 2% rispetto al valore iniziale.

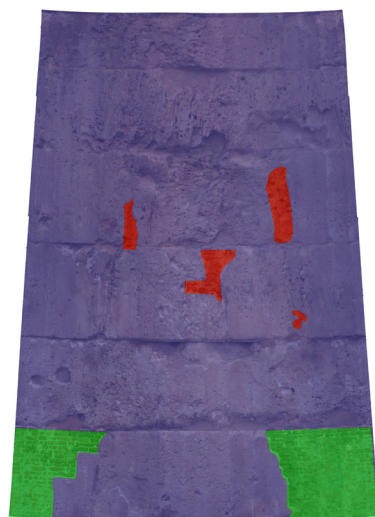
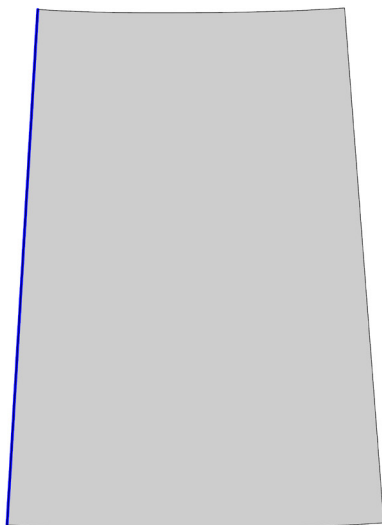
La creazione di questa superficie ausiliare è propedeutica allo sviluppo vero e proprio della *mesh*: grazie allo strumento di trasformazione "scorri lungo una superficie" è possibile, infatti, trasformare una superficie a maglia triangolare "adagiandola" su una superficie di riferimento che, nel caso in esame, sarà proprio la superficie NURBS precedentemente generata.

A sviluppo ottenuto, la superficie *mesh* sarà "disgiunta" anch'essa lungo la linea mediana della scanalatura prestabilita, e la *texture* a essa associata manterrà una salda corrispondenza con la geometria della superficie.

Dalla *mesh* sviluppata è possibile produrre un'ortofoto del modello sulla quale tracciare, con semplici comandi CAD, le regioni interessate da

degrado e calcolarne con buona approssimazione l'area. Inoltre, grazie alla reversibilità del procedimento di sviluppo della *mesh*, la mappa *raster* dei degradi così ottenuta può essere utilizzata per una nuova texturizzazione del modello 3D.

Per quanto riguarda il calcolo delle aree interessate da fenomeni di degrado è sufficiente, nei casi più comuni, effettuare le misurazioni sull'ortofoto, ma qualora si richiedano informazioni metriche più dettagliate, queste possono essere desunte direttamente dalla superficie sviluppata: infatti la superficie del fusto, pur essendo "srotolata" su un piano, continua a conservare una tridimensionalità dovuta, ad esempio, alle sue asperità come le lacune, o più semplicemente alle concavità delle scanalature stesse. Per tale ragione, dove necessario, è possibile suddividere tale superficie ricorrendo alle polilinee planari impiegate per circoscrivere le aree soggette a degrado ed eseguirne un calcolo assai più accurato attraverso processi automatici d'interrogazione



delle porzioni di superficie di volta in volta individuate.  
Un procedimento del tutto analogo è stato impiegato per lo sviluppo dell'echino del capitello: la superficie ausiliaria è stata costruita per rivoluzione intorno ad un'asse del profilo estratto da una sezione verticale e radiale dell'echino e, attraverso i comandi già descritti e utilizzati per il fusto, è stata sviluppata su un piano; da essa è stato possibile sviluppare la superficie *mesh* dell'echino.

Spesso le tecniche fotogrammetriche e *laser scanning* non sono impiegate contestualmente nel rilievo di un singolo bene, ma nel caso in esame, l'uso integrato di due differenti metodologie ha permesso di superare ostacoli operativi e ambientali e di sfruttare le peculiarità specifiche di ciascun metodo, che solo in rari casi coincidono. Questo connubio ha fornito un valido supporto per la costruzione di modelli 3D sui quali testare e definire semplici procedure di sviluppo di superfici; tali procedimenti, geometricamente controllabili e applicabili a un numero elevato di casi, consentono una rappresentazione bidimensionale di superfici caratterizzate da un semplice o alto grado di curvatura. Nel campo del restauro questa soluzione permette di fornire agli addetti ai lavori degli elaborati grafici di facile gestione che, grazie all'alta risoluzione fotografica, forniscono un valido supporto sul quale individuare, tracciare, misurare e annotare le informazioni utili ai fini del restauro.

Fig. 8 A sinistra lo sviluppo della superficie NURBS ausiliaria, a destra lo sviluppo della superficie *mesh* texturizzata.

Fig. 9 Simulazione di mappatura dei fenomeni di degrado sull'ortofoto e *texturing* del fusto della colonna.



Fig. 10 Sviluppo della superficie dell'echino.

#### NOTE

[1] I modelli *mesh* delle colonne sono stati realizzati utilizzando il software CloudCompare sviluppato da Daniel Girardeau-Montaut. Le superfici sono state costruite a partire da nuvole di punti, importate nel formato "ptx", utilizzando il tools *Poisson Surface Reconstruction*, sviluppato da M.Kazhdan, M. Bolitho e H. Hoppe.

[2] VisualSFM è software che sfrutta le tecniche di *Structure From Motion* per la ricostruzione di scene 3D da immagini fotografiche, sviluppato da C. Wu.

[3] SfMGeoRef è un software sviluppato da M. James per la georeferenziazione di nuvole di punti generate con software di *Structure From Motion*.

[4] I progetti fotogrammetrici sono stati elaborati utilizzando un computer dotato di due processori Intel Xeon E7 da 2,0 GHz con 8 core fisici ciascuno (per un totale di 32 thread), di 32 GB di RAM e scheda video Nvidia Quadro K5000. Il tempo medio del computo della correlazione degli scatti fotografici e orientamento relativo si è attestato intorno ai trenta minuti per ogni set costituito in media da 140 fotogrammi.

[5] La scelta di utilizzare lo stesso set di foto del peristilio associato di volta in volta al set di fotogrammi delle singole colonne ha consentito di ridurre drasticamente i tempi necessari all'individuazione di punti omologhi essendo questi distribuiti su peristilio e pertanto i medesimi ad ogni singolo progetto fotogrammetrico.

[6] I processi di texturizzazione dei modelli sono stati condotti, in test di laboratorio, anche utilizzando il software della Agisoft Photoscan Pro. Impiegando il medesimo set di foto, a parità di risoluzione, la texture elaborata da tale software mostra una perdita di dettaglio maggiore di quella riscontrabile con MeshLab.

#### BIBLIOGRAFIA

Apollonio F. I., Ballabeni M., Gaiani M. (2014), *Color enhanced pipelines for reality-based 3D modeling of on site medium sized archaeological artifacts* in *Virtual Archaeology Review*, vol. 5, Número 10, pp. 59-76.

Rieck B. Mara H., Krömker S. (2013), *Unwrapping highly-detailed 3D meshes of rotationally symmetric man-made objects*, in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5/W1, 2013XXIV International CIPA Symposium, 2 - 6 September, Strasbourg, France.

James M.R., Robson S. (2012), *Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application*, in *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Volume 117, Issue F3, pp. 1-17.

Wu C., Agarwal S., Curless B., Seitz S.M. (2011), *Multicore Bundle Adjustment*, in *CVPR, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* pp.3057-3064.

Wu C., *VisualSFM: A Visual Structure from Motion System* (<http://ccwu.me/vsfm/>) - Research Programme at the CSE GRAIL Lab (University of Washington at Seattle).

Callieri M., Cignoni P., Corsini M., Scopigno R. (2008), *Masked Photo Blending: mapping dense photographic dataset on high-resolution 3D models*, in *Computer & Graphics*, Volume 32, Number 4, page 464-473.

Beraldin J.A. (2004), *Integration of laser scanning and close range photogrammetry - the last decade and beyond*, in the XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress. Commission VII, pp. 972-983. Istanbul, Turkey. July 12-23.

Beraldin J.A., Picard M., El-Hakim S.F., Godin G., Valzano V., Bandiera A., Latouche C., (2002), *Virtualizing a Byzantine Crypt by combining high-resolution textures with laser scanner 3D data*, in *VSM 2002*, 25-27 september, Gyeongju, Korea.