



**Anna Maria Manfredini**  
Ingegnere edile, Dottore di Ricerca, dal 2008 è ricercatrice presso la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Bologna. Dal 1997 ha insegnato presso la Facoltà del Design del Politecnico di Milano e la Facoltà di Ingegneria di Bologna. Si interessa di tecnologie multimediali per la comunicazione dell'architettura e dei Beni Culturali.



**Michele Russo**  
Architetto e Dottore di Ricerca, ricercatore a tempo determinato presso il Dipartimento di Design del Politecnico di Milano. Dal 2003 ad oggi si è occupato di tematiche relative al rilievo 3D e alla modellazione digitale dei Beni Culturali e del Design, è revisore ed autore di articoli su rivista e atti di convegno nazionali ed internazionali sui temi di 3D Imaging.

## Dal rilievo alle rappresentazioni ad alta risoluzione dello spazio architettonico continuo. Il caso di studio del complesso dell'Abbazia di Pomposa

### *From survey to high definition representations of a continuous architectural space. The case study of the Pomposa Abbey complex*

Il progetto di rilievo e rappresentazione ad alta risoluzione dell'Abbazia di Santa Maria di Pomposa nasce con l'obiettivo di mettere a confronto differenti metodologie di rilievo e rappresentazione, valutare le prestazioni e le soluzioni più idonee finalizzate ad ottenere un rilievo e una rappresentazione complessiva dell'intero complesso abbaziale, che consenta restituzioni e analisi multi-scalari. Il presente contributo presenta alcuni dei risultati ottenuti dall'utilizzo integrato di tecniche di rilievo 3D e illustra alcune tipologie di analisi e rappresentazioni grafiche che possono essere condotte e riprodotte a partire dal dato complesso e multi-scalare acquisito. Il contributo mostra come tale approccio non sia destinato ad un singolo caso studio, ma partendo da esso possa essere esteso ad altri contesti che presentino simili criticità e potenzialità comunicative, spesso ricorrenti nel campo del rilievo e della rappresentazione dei Beni Culturali.

The aim of this paper is to show the main results about high resolution 3D digital survey and representations of Santa Maria di Pomposa complex. The project has been developed in order to compare different methodologies, evaluating their effectiveness in the survey and representation of a huge architectural complex. This digitization campaign was planned for reproducing different multi-scalar representations, analyzing the digital replica of the site from different points of view and for different communication purposes. The paper presents some exemplifications of graphic representations extracted from a complex and multi-scalar 3D digital model. The adopted approach and the methodology has been developed and tested on field about a specific case study, but it can be extended to other examples which will present similar characteristics in critical and potential terms, common in several Cultural Heritage case studies.

**parole chiave:** modello 3D integrato, rappresentazione multi-scalare, modello continuo, Pomposa

**keywords:** integrated 3D model, multi-scalar representations, continuous model, Pomposa

## 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi trent'anni gli sviluppi nel campo delle tecnologie digitali hanno messo a punto una serie di strumenti e metodiche in grado di acquisire digitalmente le informazioni geometriche e radiometriche di oggetti tridimensionali con un grado di accuratezza e di risoluzione tali da consentirne la riproposizione come repliche virtuali della realtà. Una delle conseguenze più interessanti dell'utilizzo di queste tecniche in campi e ambiti diversi consiste nella possibilità di sostituire un oggetto reale con la sua copia digitale, interagendo con essa ed adattando il livello di densità informativa contenuto nella restituzione in funzione di obiettivi e finalità di indagine differenti.

La capacità di controllare lo spazio tridimensionale continuo, inteso come replica fedele della realtà, in cui tutte le informazioni geometriche e cromatiche sono rese disponibili attraverso analisi di tipo diverso, ha aperto nuove prospettive nelle attività di rilevamento architettonico e archeologico in grado di fornire il supporto grafico per differenti tipi di analisi e, più in generale, per l'ampliamento della conoscenza dell'esistente.

In alcuni ambiti specifici che richiedono l'acquisizione di dati estremamente accurati ad alta risoluzione, come ad esempio quello del rilievo archeologico o dei monitoraggi, queste tecnologie stanno sostituendo quelle utilizzate nel rilievo tradizionale grazie alla loro maggiore versatilità di utilizzo. Se infatti gli strumenti tradizionali prevedono il rilievo di informazioni da parte di operatori con competenze ed esperienze specifiche, in grado di selezionare i dati da rilevare in funzione delle finalità della singola restituzione, l'utilizzo di strumenti ad alta risoluzione consente di acquisire rapidamente grandi quantità di dati e di rimandare alla fase di elaborazione la selezione delle informazioni da restituire. Questa flessibilità consente l'impiego dei dati acquisiti per differenti finalità, che possono mutare nel tempo.

Ad oggi il panorama di soluzioni e tecnologie maggiormente diffuse e destinate al rilievo digitale tridimensionale ad alta risoluzione nel campo dei Beni Culturali comprende tecnologie basate su sensori attivi (range-based), quali ad esempio

il laser scanning, e quelle che impiegano sensori passivi (image-based), quali la fotogrammetria digitale ad alta risoluzione [Blais 2004; Remondino – El Hakim 2006; Guidi et al. 2010; Manferdini – Remondino 2010; Vosselman – Maas 2010; Remondino 2011; Pirotti et al. 2013] integrata con metodiche di elaborazione automatica delle immagini, quali lo Structure from Motion [Snaveley et al. 2006; Vergauwen - Van Gool 2006; Agarwal et al., 2009; Barazzetti et al. 2010; Del Pizzo – Troisi 2011]. I recenti sviluppi nel campo dei sensori attivi consentono di acquisire dati complessi anche in movimento [Graham 2010; Kaartinen et al. 2012], con evidenti vantaggi sui tempi di campagna di rilievo.

In questo ampio spettro di possibilità, la scelta della metodologia e della tecnologia più idonee rappresenta un aspetto di fondamentale importanza, in grado di determinare il livello qualitativo del rilievo. Questa valutazione iniziale deve tenere in considerazione diversi fattori, quali le caratteristiche geometriche e materiche degli elementi oggetto di indagine (dimensione minima di dettaglio, ingombro, presenza di eventuali superfici traslucide, riflettenti o molto scure, finitura superficiale omogenea), le condizioni di rilievo (accessibilità dell'oggetto da rilevare), le finalità della restituzione e le caratteristiche degli strumenti di rilievo (accuratezza ed incertezza di misura, risoluzione geometrica e radiometrica, campo inquadrato e distanza di lavoro, ecc.).

Nel campo dei Beni Culturali, a fronte di una ampia gamma di casi di studio con caratteristiche peculiari difficilmente riconducibili a ricorrenze, è possibile determinare delle procedure ottimizzate e alcune "best practices" che possono essere adattate di volta in volta in base alle caratteristiche del caso studio analizzato. Inoltre, alcuni aspetti legati ad esempio ai tempi di elaborazione dei dati, alle competenze, ai costi, agli oneri computazionali, alla interoperabilità dei dati, contribuiscono a limitarne una più ampia diffusione. Diverse esperienze di rilievi digitali tridimensionali ad alta risoluzione hanno mostrato come l'integrazione fra soluzioni e tecnologie diverse rappresenti in molti casi un approccio in grado di sfruttare al meglio le potenzialità degli strumenti

in funzione delle caratteristiche dell'oggetto da rilevare e delle finalità comunicative [Guidi et al. 2002; Velios and Harrison 2002; Böhler and Marbs 2004; El-Hakim et al. 2004; Guidi et al. 2006, Guidi et al. 2009; Callieri et al. 2011].

Il progetto di rilievo ad alta risoluzione dell'Abbazia di Santa Maria di Pomposa si inserisce in questo panorama e nasce con l'obiettivo di indagare le possibilità di integrazione di tecniche di rilievo digitale differenti, al fine di sfruttare appieno le potenzialità offerte dai singoli approcci e restituire un modello globale del complesso architettonico che consenta analisi da differenti punti di vista e restituzioni ad un livello di dettaglio multiscalar (figura 1).

Nel campo del rilievo dei Beni Culturali, l'unicità del caso di studio presentato nell'articolo è data non soltanto dal suo valore storico e artistico, ma anche dal primato di essere stato uno dei primi sei casi rilevati in Italia utilizzando tecniche di rilievo digitale tridimensionale. Tale rilievo, avviato nel 1998 a seguito di un accordo firmato fra l'Università di Ferrara e il Visual Information Technology Department del National Research Council canadese (NRCC), aveva la finalità di sperimentare l'integrazione fra tecniche di 3D laser scanning e tecniche fotogrammetriche [El Hakim et al. 2003]. La campagna di acquisizione 3D del complesso monastico ha rappresentato per l'epoca un progetto pionieristico sia per le metodologie di rilevamento adottate, sia per l'utilizzo integrato dei dati acquisiti, che ha consentito di sfruttare al massimo le potenzialità degli strumenti allora esistenti. In quella occasione è stato possibile acquisire ad alta risoluzione solamente alcune piccole porzioni della facciata, che furono contestualizzate all'interno di modelli semplificati degli edifici.

A quindici anni di distanza, grazie ai notevoli sviluppi e risultati raggiunti nell'ambito delle tecniche e degli strumenti per l'acquisizione 3D, l'esperienza di rilevamento condotta sul complesso Abbaziale di Pomposa ha avuto come principale obiettivo quello di definire un modello digitale ad alta risoluzione dell'intero complesso, in grado di fornire un supporto unico ma allo stesso tempo flessibile per diverse finalità di indagine,



Fig. 1. Viste generali esterne ed interne riprese con fotocamera terrestre e da drone del complesso dell'Abbazia di Pomposa.

comunicazione e promozione del monumento. Il presente contributo presenta i risultati ottenuti tramite l'utilizzo integrato di differenti tecniche di rilevamento, riportando alcune rappresentazioni grafiche che possono essere ottenute a partire dal dato multi-scalare acquisito. L'approccio adottato e la metodologia messa a punto non è limitata ad un caso di studio specifico, ma può essere applicata in molte altre situazioni, nelle quali siano presenti medesime criticità di rilevamento [1].

## 2. LA METODOLOGIA DI RILIEVO ADOTTATA

Il progetto di rilievo del complesso architettonico dell'Abbazia di Pomposa è stato eseguito mediante l'utilizzo di tecnologie attive e passive, terrestri ed aeree, al fine di valutare la possibilità di integrare tecniche di acquisizione fotogrammetrica basate sul processo di Structure from Motion (SfM) con consolidate metodologie di acquisizione 3D da laser scanner, ottenendo in tal senso un modello integrato completo dell'intero complesso abbaziale.



Fig. 2. Esempi di sequenze di immagini utilizzate nei rilievi fotografici terrestre e aereo.

Le procedure di SfM integrate oggi nei principali programmi di foto modellazione nascono nell'ambito della Computer Vision come strumenti rapidi, a basso costo e di semplice utilizzo, in grado di generare dense nuvole di punti da immagini fotografiche. Sebbene tali tecniche nascano con l'obiettivo principale di restituire visualizzazioni fotorealistiche degli oggetti fotografati, alcune ricerche condotte nel campo dei Beni Culturali stanno verificandone l'affidabilità dal punto di vista metrico all'interno di determinate soglie e scale di rappresentazione [Hermon et al. 2010, Dellepiane et al. 2013; Manferdini – Galassi 2013; Manferdini – Russo 2013].

Nel caso specifico di Pomposa, queste tecniche sono state sperimentate applicando fotografie terrestri e aeree. I risultati ottenuti da tali ricostruzioni sono state quindi confrontate con la nuvola di punti acquisita con tecniche di laser scanning, con l'obiettivo di quantificare non solo

gli eventuali scostamenti in termini metrici fra modelli differenti, ma di valutare anche la completezza della copertura di acquisizione consentita dai differenti approcci. In questo processo comparativo, un obiettivo non secondario è dato dall'analisi di alcuni aspetti che possono influire sull'intero processo di ricostruzione tridimensionale, quali ad esempio quelli legati ai tempi, ai costi, alle competenze, agli oneri computazionali richiesti per valutare eventuali possibilità di integrazioni fra tecniche diverse finalizzate non solo a fornire un modello completo e continuo del manufatto, ma anche ad ottimizzare i dati restituiti e l'intero processo di elaborazione.

### 3. IL RILIEVO INTEGRATO

3.1. Campagna di rilievo con sensori attivi  
 Il rilievo mediante tecniche di laser scanning è

stato organizzato in due sessioni parallele, volte ad ottimizzare i tempi di acquisizione. In particolare, la superficie esterna del complesso è stata rilevata utilizzando un laser scanner a tempo di volo ScanStation C10 (Leica), mentre l'interno dell'abbazia è stato acquisito utilizzando lo scanner a differenza di fase Focus 3D (Faro).

L'acquisizione esterna del complesso ha previsto la predisposizione di una rete di 21 stazioni referenziate fra di loro utilizzando target per l'allineamento automatico delle singole prese, inserendo nella rete due prese di collegamento interne alla Chiesa.

L'acquisizione interna all'abbazia è stata eseguita mediante uno scanner a differenza di fase, che è stato posizionato in 31 differenti stazioni, a loro volta referenziate con il rilievo dell'esterno.

3.2. Campagna di rilievo con sensori passivi  
 Parallelamente alle acquisizioni con laser scan-

ner, sono state avviate diverse campagne di rilievo fotografico. All'interno dell'abbazia è stata usata una camera NIKON D90 equipaggiata con un obiettivo AF-S DX Nikkor 18-105 mm. All'esterno del complesso invece sono state condotte due campagne di rilievo con due camere differenti utilizzate a diverse distanze dall'edificio: la camera FUJIFILM FinePix HS20EXR è stata utilizzata per le riprese da lontano dell'intero complesso architettonico, mentre la stessa camera NIKON D90 è stata utilizzata ad una distanza variabile dai 3 ai 7 metri dai singoli fronti dei fabbricati.

Infine, due ulteriori campagne di rilievo fotografico sono state condotte utilizzando una camera mirrorless Canon Eos M montata su un drone S800 Evo UAV, in grado di effettuare sia riprese nadirali, finalizzate ad acquisire immagini dettagliate delle coperture, sia riprese con fotocamera ad asse inclinato, con l'obiettivo di rilevare anche porzioni dei fronti e consentire un migliore allineamento con le riprese terrestri (figura 2).

In fase di campagna di rilievo fotografico dell'esterno, un elemento di criticità è rappresentato dalla fitta vegetazione che circonda l'edificio e che in alcuni tratti (in particolare lungo i fronti Est e Sud) è addossata ai fronti dei fabbricati e non consente riprese libere da ostacoli.

In queste aree, la ricostruzione tridimensionale ha pertanto evidenziato evidenti errori metrici e lacune nelle nuvole di punti acquisite.

### 3.3 Elaborazione dei dati e comparazioni

Tutte le immagini fotografiche sono state elaborate utilizzando l'applicazione PhotoScan (Agisoft) che consente di allineare le foto fra di loro, di risalire ai punti di ripresa fotografica e di ricostruire le nuvole di punti dense.

I dati acquisiti sono stati successivamente filtrati, ossia ripuliti da eventuali elementi non necessari (vegetazione, arredi, ecc.) e dal 'rumore', ossia dai punti 'sparsi' non appartenenti a superfici che corrispondono ad elementi architettonici. Le nuvole così elaborate sono state successivamente scalate prima della fase di confronto con la scansione laser di riferimento.

La messa in scala del modello consiste nell'attribuzione di dimensioni assolute agli elementi

ricostruiti con dimensioni relative. Questa fase rappresenta una criticità all'interno dell'intero processo di ricostruzione e comparazione, poiché il livello di accuratezza nella sua esecuzione determina in maniera inequivocabile l'attendibilità metrica del modello finale e dei relativi confronti fra i modelli.

Nel caso di studio in esame, il parametro di scala è stato determinato dal valore medio di tre lunghezze significative selezionate sul modello da laser scanner, in maniera da minimizzare gli errori derivanti dalla scelta del singolo punto sul modello.

I dati così elaborati sono stati decimati per consentirne l'effettiva gestibilità, poiché in entrambi gli approcci range e image-based i modelli generati richiedono oneri computazionali al limite delle prestazioni dei calcolatori su cui vengono elaborati.

I modelli tridimensionali sono stati successivamente registrati fra di loro, prima manualmente e poi automaticamente, utilizzando l'algoritmo di ICP (Iterative Closest Point) che consente di minimizzare l'errore in fase di allineamento delle nuvole di punti. A questa fase è seguita quella di comparazione per la valutazione degli scostamenti in termini metrici fra i modelli ottenuti utilizzando tecniche SfM e quello di riferimento ottenuto da laser scanner. L'analisi dei valori di deviazione standard e distanza media fra le coppie di modelli ha messo in evidenza la capacità delle singole tecniche adottate di rilevare zone critiche del complesso architettonico, quali ad esempio quelle nascoste dalla vegetazione, quelle poco accessibili per via dell'altezza da terra (parte alta del campanile e alcune porzioni delle coperture) o nascoste da altri manufatti (zone fra i contrafforti sulla copertura della chiesa).

Se dal punto di vista metrico gli scostamenti fra le coppie di nuvole di punti danno una deviazione standard che varia attorno allo 0,13, la distanza media è di 7 cm fra il modello da laser scanner e quello da immagini riprese da lontano.

Per quanto riguarda invece la possibilità di acquisire porzioni di manufatto poco accessibili, il laser scanner ha consentito di acquisire i fronti dei fabbricati nascosti dalla vegetazione, mentre alcune

falde di copertura sono state rilevate unicamente utilizzando la macchina fotografica montata su drone.

I confronti fra i dati acquisiti hanno evidenziato una capacità, da parte dell'approccio fotogrammetrico integrato con metodiche SfM, di rilevare e restituire informazioni tridimensionali paragonabili, alla scala architettonica, a quelle rilevate mediante laser scanner. Tuttavia, l'acquisizione fotografica richiede la predisposizione di un progetto preliminare dettagliato, finalizzato a stabilire il numero di immagini fotografiche e la collocazione dei punti di presa in funzione della risoluzione delle immagini e, pertanto, dell'ottica utilizzata e della distanza dall'oggetto da rilevare. In fase operativa, le difficoltà dovute ad eventuali impreviste condizioni di rilievo e al rispetto di un preciso progetto di ripresa fotografica possono portare in alcuni casi a lacune o incoerenze dei dati restituiti o alla sovrabbondanza di informazioni rilevate, con conseguenti difficoltà di gestione di grandi quantità di dati.

A fronte di queste prestazioni, le tecniche di laser scanning hanno invece garantito una maggiore affidabilità dal punto di vista operativo. Il progetto di rilievo consiste infatti essenzialmente nel tracciamento di una rete poligonale di stazioni visibili fra di loro in successione e nella selezione della risoluzione delle singole riprese in funzione della dimensione minima di dettaglio da restituire.

Nel caso dell'Abbazia di Pomposa, le caratteristiche materiche delle superfici rilevate e la dimensione minima del dettaglio sono perfettamente compatibili con le prestazioni fornite dalla strumentazione adottata, con evidenti vantaggi sia in fase di rilievo che di elaborazione dei dati. L'unica limitazione è consistita nella impossibilità di eseguire riprese da altezze diverse, non avendo a disposizione ponteggi o la possibilità di definire punti di stazione in edifici adiacenti [2].

#### 4. ANALISI E RESTITUZIONI

Tali considerazioni hanno supportato la sperimentazione sulla integrazione fra i dati acquisiti con laser scanner e con immagini fotografiche rilevate da drone (figura 3), realizzata mediante una prima scalatura dei dati ottenuti dalle immagini, riportati alle dimensioni assolute rilevate dallo scanner, e la successiva registrazione dei due modelli dimensionalmente coerenti ad un unico sistema di riferimento.

Il modello così ottenuto è stato successivamente utilizzato per sperimentare diverse possibilità di restituzione grafica in funzione di differenti obiettivi. La nuvola di punti complessiva rappresenta infatti l'insieme dei dati metrici multi scalari, l'ossatura attorno alla quale possono essere estratte e successivamente elaborate informazioni di dettaglio secondo codici e linguaggi differenti.

Le forme di rappresentazione che possono essere definite a partire da un unico modello disponibile sottoforma di nuvola di punti sono diverse e vengono costruite a partire dalla nuvola stessa (dato discreto), o dalla sua trasposizione in superficie poligonale (dato continuo).

Per quanto riguarda il primo approccio, la generazione di elaborati grafici tecnici bidimensionali, ad esempio, rappresenta una di queste possibilità comunicative, ricorrente sia in contesti legati alla gestione della consistenza metrica del bene rappresentato, che a quella di pianificazione e gestione di eventuali interventi di restauro e di cantiere. Figura 4 riporta ad esempio la generazione di proiezioni ortogonali derivate dalla selezione manuale dei punti significativi della nuvola sezionata utilizzando piani di intersezione predefiniti. La generazione di elaborati tecnici vettoriali bidimensionali di questo tipo può essere attualmente ottenuta unicamente mediante utilizzo di strumenti di ridisegno manuale, a fronte di una serie di elaborazioni grafiche destinate a semplici visualizzazioni, costruite utilizzando procedure e strumenti automatici integrati all'interno di programmi di gestione e manipolazione di nuvole di punti.

Un'altra possibilità di utilizzo della nuvola di punti per la generazione di elaborati grafici bidimensio-



Fig. 3. Nuvola di punti complessiva generata dalla integrazione fra tecniche di rilievo differenti.

nali ad alta risoluzione consiste nella creazione di ortofoto. Nel caso del rilievo dell'Abbazia di Pomposa, sebbene il modello integrato sia metricamente accurato e ad alta risoluzione, l'informazione radiometrica restituita risente delle evidenti limitazioni delle tecnologie di laser scanning. Esse consentono infatti di rivelare una informazione disceta, ossia discontinua, e di qualità ridotta per via delle caratteristiche intrinseche delle fotocamere integrate nei laser scanner. A questa caratteristica si aggiunge una evidente disomogeneità fotometrica e radiometrica dell'informazione derivata, nel caso specifico, dall'integrazione fra tecniche image-based e range-based.

Per sopperire a questa limitazione, è possibile proiettare immagini fotografiche ad alta risoluzione sulla nuvola di punti complessiva e ottenere, ad esempio, ortofoto ad alta qualità e metricamente accurate, poiché basate sulla corrispondenza di coppie di punti omologhi sulle immagini

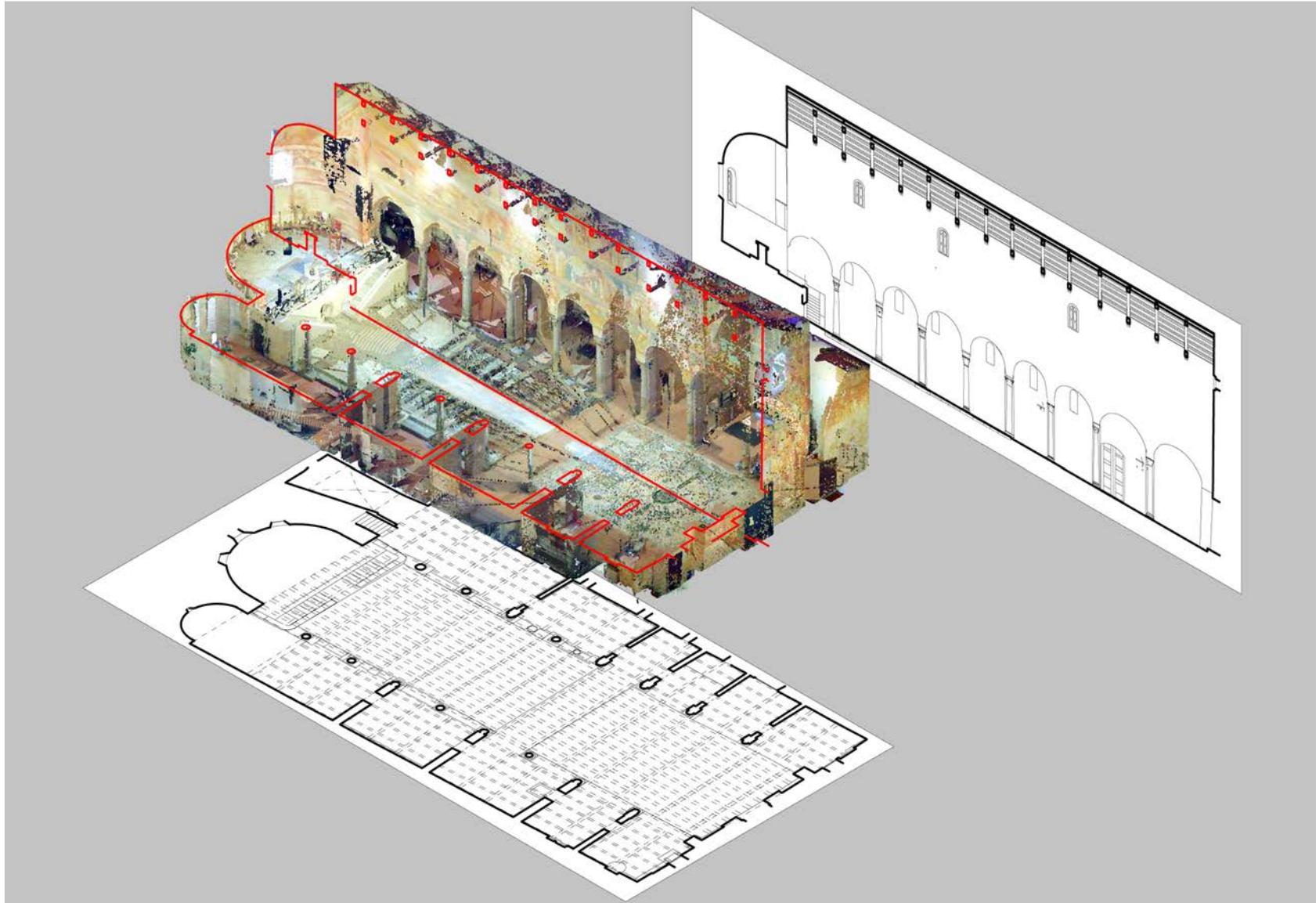


Fig. 4. Esempio di elaborati grafici tecnici bidimensionali a partire dal modello tridimensionale di rilievo.

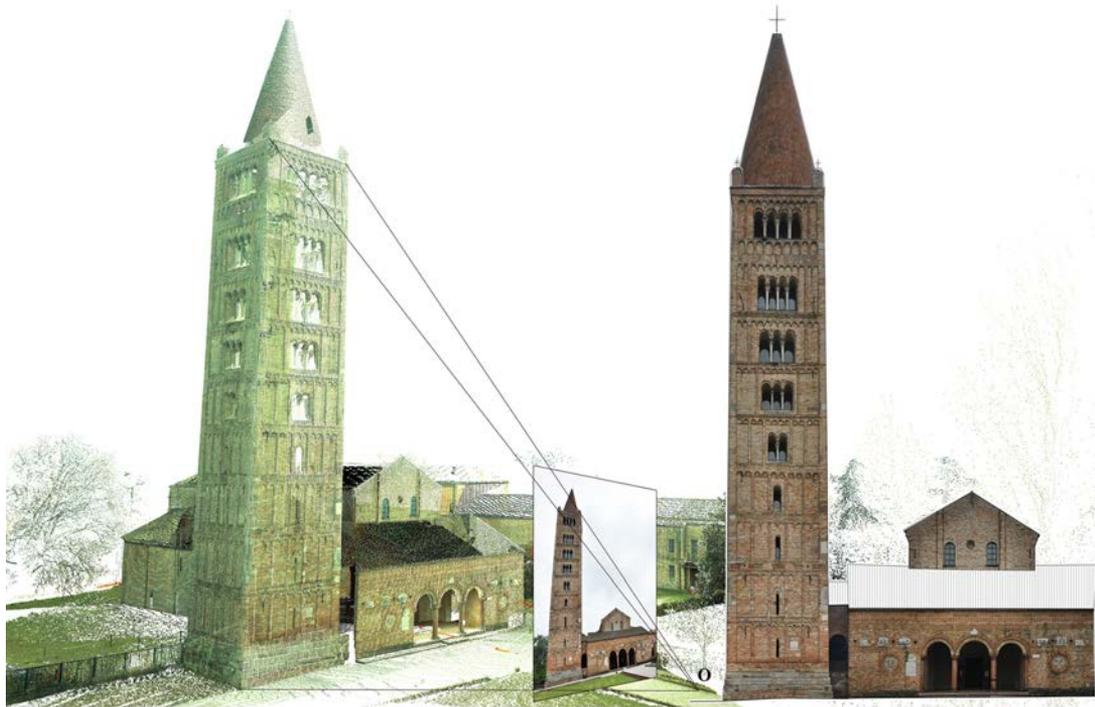
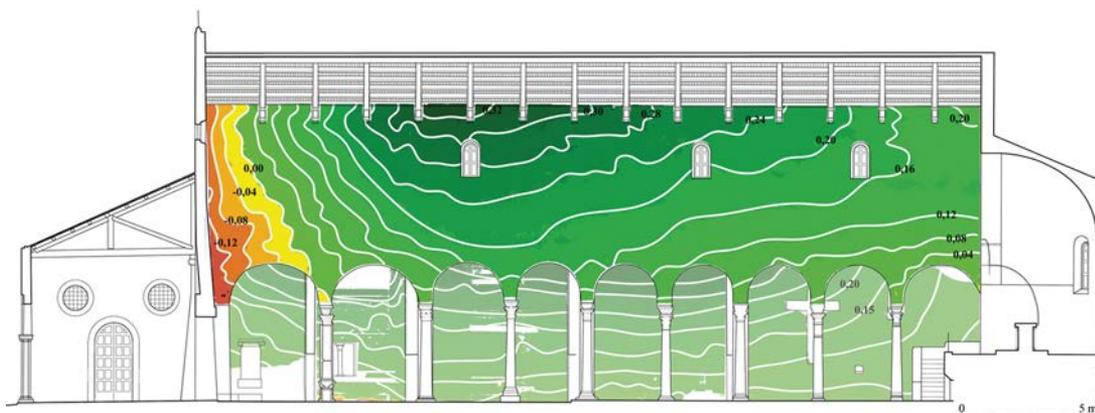


Fig. 5. Proiezione di immagini fotografiche sulla nuvola di punti per la generazione di ortofoto. Il processo di generazione dell'ortofoto della facciata passa necessariamente dalla proiezione della informazione contenuta nella fotografie sul modello 3D, il quale viene riproiettato su un piano in maniera corretta, eliminando ogni possibile sottosquadro.

Fig. 6. Sezione della basilica lungo l'asse longitudinale con relativa mappatura dei fuori piombo della muratura della navata centrale e laterale dalla parte del campanile. La definizione di un sistema di riferimento con l'asse z verticale, relativo ad uno dei vertici della muratura principale sopra descritta, e la generazione di un piano di fitting passante per tale sistema, consente di andare a verificare il discostamento fra il piano matematico creato ed i punti rilevati con un passo di campionamento talmente denso da poter considerare l'analisi "quasi continua". Tale distanza quantifica lo spanciamento della muratura rispetto al piano verticale ideale.



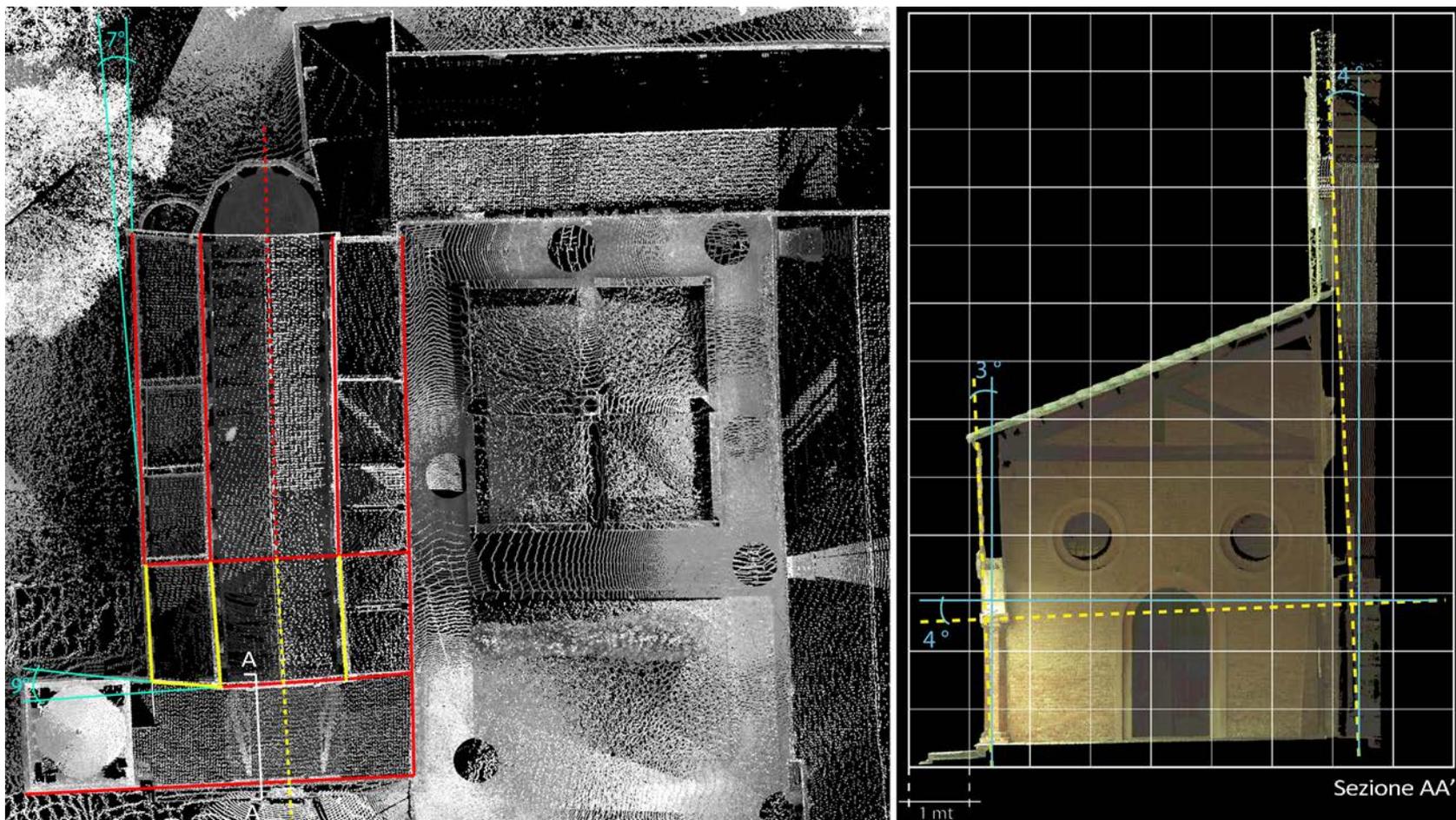


Fig. 7. Esempio di individuazione delle macro-deformazioni che interessano l'intero complesso architettonico. Dalla planimetria della nuvola di punti emerge chiaramente una rotazione importante della parte anteriore, contrassegnata dalle linee gialle e in prossimità della torre campanaria, rispetto alla griglia di base (linee rosse). Sezione del narceo antistante la chiesa, in direzione del campanile. Sovrapponendo una griglia metrica, risultano evidenti i fuori piombo delle strutture verticali e la rotazione dell'imposta del capitello, evidenziate in giallo.

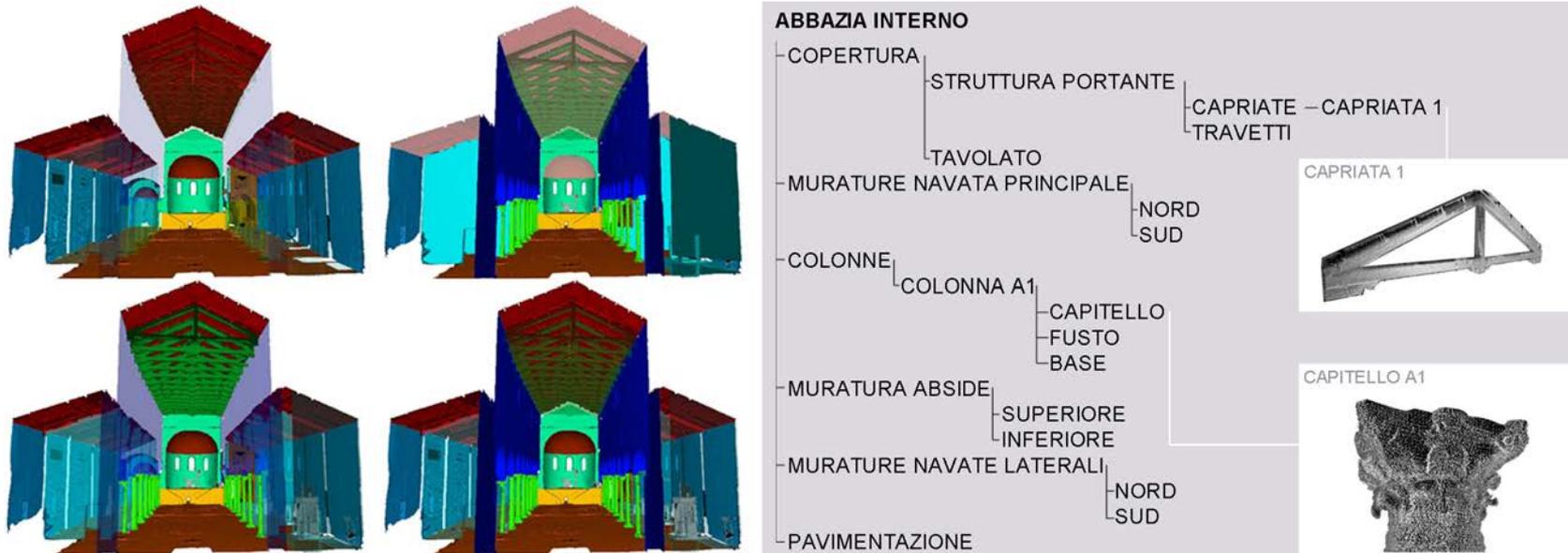


Fig. 8. Esempio di classificazione semantica della nuvola di punti ed estrazione di informazioni relative ai singoli elementi componenti.

fotografiche e sui punti rilevati dal laser scanner (figura 5).

Un altro ambito in cui le caratteristiche di accuratezza e risoluzione delle informazioni continue acquisite mediante utilizzo di laser scanner è di fondamentale importanza è quello del monitoraggio. L'analisi delle informazioni multiscalarì consente infatti di mappare sia deformazioni localizzate che fenomeni estesi riguardanti ampie superfici (figura 6), avendo nel contempo un controllo globale dell'intero complesso architettonico (figura 7) che permette una lettura completa dei fenomeni di deformazione, e una più immediata ed efficace individuazione delle possibili cause.

Oltre a queste possibilità di utilizzo, la nuvola di punti generata dal rilievo integrato può essere suddivisa semanticamente e organizzata secondo gerarchie omogenee, in grado di espandere o contrarre singoli elementi caratterizzati da livelli

di complessità differenti. Tale suddivisione, molto onerosa in termini di tempo-uomo, consente di ottimizzare la gestione del modello complessivo, semplificando e rendendo maggiormente efficaci tutte le operazioni preliminari alla costruzione del modello poligonale, ovvero la pulizia dei dati spuri e la decimazione o eliminazione delle informazioni ridondanti. (figura 8).

All'interno di questo sistema informativo tridimensionale, i singoli elementi architettonici rappresentano entità alle quali possono essere collegate informazioni di tipo differente, secondo un sistema di archiviazione delle informazioni in continuo aggiornamento ed espansione.

Oltre a questi aspetti, nel campo dei Beni Culturali, in ambiti e contesti specifici, la possibilità di convertire le nuvole di punti in modelli poligonali continui costituisce un requisito fondamentale ai fini della rappresentazione grafica dell'elemento digitalizzato. Se tale operazione è largamente

consolidata nell'ambito del rilievo territoriale, attraverso la generazione di DTM (Digital Terrain Model), rappresenta tuttoggi un passaggio delicato nella filiera di produzione di risultati grafici relativi a elementi e manufatti architettonici e archeologici [Remondino 2003].

La complessità insita nella poligonizzazione di nuvole di punti ottenute da tecniche range e image-based è legata principalmente a due fattori: il dato di partenza e il processo di calcolo per la generazione del modello. I dati acquisiti sono infatti spesso non organizzati dal punto di vista gerarchico, sono affetti da rumore e dalla presenza di dati sparsi. Per quanto riguarda il processo di calcolo, è spesso complesso individuare la migliore metodologia in grado di ricostruire la superficie poligonale con un grado di accuratezza e risoluzione adeguate alle finalità della restituzione.

Per questo motivo, la generazione di superfici poligonali deve sempre essere preceduta da una se-

Fig. 9. Esempio di poligonalizzazione di elemento architettonico della facciata della chiesa..



rie di passaggi di pre-elaborazione dei dati, quali il filtraggio dei dati sparsi, ridondanti, la riduzione del rumore senza perdita di dettaglio, a cui deve seguire una fase di post-elaborazione finalizzata a correggere errori topologici, colmare le lacune ed eliminare eventuale rumore residuo.

Nel caso dell'Abbazia di Pomposa, la necessità di analizzare, gestire e visualizzare alla scala di grande dettaglio specifici elementi architettonici ha dato l'impulso alla poligonalizzazione di alcune porzioni del modello.

Per un determinato livello di dettaglio, i modelli digitali generati seguendo il processo descritto rappresentano una copia fedele della superficie reale continua, alla quale è possibile associare una informazione radiometrica ad alta risoluzione e dalla quale è possibile determinare automaticamente sezioni bidimensionali secondo piani definiti dall'utente o informazioni relative alla quantificazione di aree e volumi (figura 9).

Per quanto riguarda la modellazione di elementi complessi, è bene tenere presente che il processo di poligonalizzazione delle nuvole di punti richiede onerose operazioni di intervento manuale sui dati che influiscono direttamente sulla accuratezza e sulla definizione del modello finale, e sono pertanto legate ad uno specifico livello di dettaglio. La gestione di modelli poligonali richiede inoltre oneri computazionali legati sia alla scala di dettaglio che alla qualità del dato radiometrico

eventualmente collegato, generalmente diversi rispetto a quelli richiesti per la manipolazione di nuvole di punti. La costruzione del modello poligonale di una architettura complessa come quella del caso di studio analizzato nel presente contributo necessita pertanto di valutazioni preliminari e di una pianificazione molto accurata di tutta la filiera di modellazione.

##### 5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La sperimentazione condotta sul complesso dell'Abbazia di Pomposa ha consentito principalmente di mettere a confronto differenti metodologie di rilevamento, basate sull'utilizzo di sistemi fotogrammetrici e laser scanner, valutandone l'attendibilità dal punto di vista metrico. In particolare ha permesso di valutare il livello qualitativo che può essere attualmente raggiunto dai

sistemi fotogrammetrici integrati con tecniche di Structure From Motion applicati ad una scala architettonica per un caso studio complesso.

La sperimentazione ha mostrato come l'uso integrato delle tecniche sopra citate possa portare alla costruzione di un modello tridimensionale complesso e multiscalare, in grado di fornire il nucleo attorno al quale organizzare informazioni di tipo eterogeneo, rispondenti a differenti esigenze di analisi.

La possibilità di produrre restituzione grafiche molto differenti a partire da un unico modello tridimensionale consente inoltre di condurre analisi incrociate di dati caratterizzati da un livello di complessità variabile e, pertanto, di mettere in relazione fenomeni differenti che interessano l'intero complesso architettonico, con evidenti vantaggi, ad esempio, nel caso di indagini di tipo diagnostico e nella pianificazione di eventuali interventi di restauro.

## NOTE

[1] Gli autori dichiarano che il loro contributo nel progetto di ricerca illustrato e nella stesura del presente contributo è stato paritetico.

[2] Gli autori vogliono estendere un sentito ringraziamento a Zenith Ingegneria S.r.l. per il prezioso supporto in fase di acquisizione mediante laser scanner, al Prof. Paolo Russo e all'Ing. Valentina Russo dell'Università di Ferrara per l'acquisizione fotografica da drone e al Prof. Claudio Alessandri dell'Università di Ferrara per aver fornito informazioni utili su ricerche pregresse sul caso studio.

Gli autori desiderano inoltre ringraziare il Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici di Ravenna nella persona dell'Arch. Antonella Ranaldi per aver appoggiato questo progetto e per aver concesso l'utilizzo dei dati acquisiti in ambito di ricerca.

## BIBLIOGRAFIA

Agarwal, Sameer; Snavely, Noah; Simon, Ian; Seitz, Steven M.; Szeliski, Richard (2009). *Building Rome in a day*, in "Proc. of Int. Conference on Computer Vision" Kyoto, Japan, 2009, pp. 1-8.

Barazzetti, Luigi; Scaioni, Marco; Remondino, Fabio (2010). *Orientation and 3D modeling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation*. In The Photogrammetric Record, 25 (132), pp. 356-381.

Böhler, Wolfgang; Marbs, Andreas (2004). *3d Scanning and Photogrammetry For Heritage Recording: A Comparison*, in "Proc. of the 12th International Conference On Geoinformatics" Gävle, Sweden, pp. 291-298.

Blais, Francois (2004). *Review of 20 years of range sensor development*. In Journal of Electronic Imaging, vol. 13, n. 1, pp. 231-243.

Callieri, Marco; Chica, Antoni; Dellepiane, Matteo; Besora, Isaac; Corsini, Massimiliano; Moyés, Jordi; Ranzuglia, Guido; Scopigno, Roberto; Brunet, Pere (2011). *Multiscale acquisition and presentation of very large artifacts: The case of Portalada*. In Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), vol. 3, n. 4, pp. 1-14.

Del Pizzo, Silvio; Troisi, Salvatore (2011). *Automatic orientation of image sequences in cultural heritage*. In Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 38(5/W16), pp. 293-300.

Dellepiane, Matteo; Dell'Unto, Nicolò; Callieri, Marco; Lindgren, Stefan; Scopigno, Roberto (2013). *Archaeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques*. In Journal of Cultural Heritage, vol. 3, n. 14, pp. 201-210.

El-Hakim, Sabry F.; Beraldin, J.-Angelo; Picard, Michel; Godin, Guy (2004). *Detailed 3d Reconstruction Of Large-Scale Heritage Sites With Integrated Techniques*. In IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 24, n. 3, pp. 21-29.

El-Hakim, Sabry F.; Beraldin, J.-Angelo; Picard, Michel; Vettore, Antonio (2003). *Effective 3D Modeling of Heritage Site*, in "Proc. of the 4th International Conference of 3D Imaging and Modeling (3DIM'03)" Banff, Alberta, Canada, pp. 302-309.

Graham, Lewis (2010). *Mobile mapping systems overview*. In Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 76, n.3, pp. 222-228.

Guidi, Gabriele; Frischer, Bernard; Russo, Michele; Spinetti, Alessandro; Carosso, Luca; Micoli, Laura L. (2006). *Three-dimensional acquisition of large and detailed cultural heritage objects*. In Machine Vision and Applications, vol. 17, n. 6, pp. 349-360.

Guidi, Gabriele; Remondino, Fabio; Russo, Michele; Menna, Fabio; Rizzi, Alessandro; Ercoli, Sebastiano (2009). *A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archeological areas*. In International Journal of Architectural Computing (IJAC), Special issue, pp. 39-55.

Guidi, Gabriele; Russo, Michele; Beraldin J.-Angelo (2010). *Acquisizione e modellazione poligonale*, McGraw Hill.

Guidi, Gabriele; Tucci, Grazia; Beraldin, J.-Angelo; Ciofi, Stefano; Damato, Valentina; Ostuni, Daniele; Costantino, Fabrizio; El Hakim, Sabry F. (2002). *Multiscale archaeological survey based on the integration of 3D scanning and photogrammetry*, in "Int. Workshop on Scanning for Cultural Herita-

ge Recording (CIPA WG/6)" Korfu, Greece, pp. 58-64.

Hermon, Sorim; Piliades, Despina; Amico, Nicola; D'Andrea, Andrea; Iannone, Giancarlo; Chamberlain, Mary (2010). *Arc3D and 3D laser scanning a comparison of two alternate technologies for 3D data acquisition*, in "Proc. of CAA 2010" Granada, Spain, pp. 55-58.

Kaartinen, Harri; Kukko, Antero; Hyypää, Juha; Jaakkola, Anttoni (2012). *Benchmarking mobile laser scanning systems using a permanent test field*, in Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B5, pp. 471-476.

Incerti, Manuela (2005). *L'Abbazia di Pomposa. Il rilievo 3D per la lettura dei dati geometrico-astronomici*, in "Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e dell'ambiente. Ricerca CÖFIN 2002", Gangemi Editore, Roma, pp. 73-76.

Incerti, Manuela (2005). *Procedure e metodiche sperimentali di rilievo mediante 3D laser scanners finalizzate all'analisi archeoastronomica dell'Abbazia di Pomposa*. In Rivista Italiana di Archeoastronomia, III, Quasar Edizioni, pp. 83-100.

Manferdini, Anna M.; Galassi, Michele (2013). *Assessments for 3d reconstructions of cultural heritage using digital technologies*, in Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W1, pp. 167-174.

Manferdini, Anna M.; Remondino, Fabio (2010). *Modellazione 3d da immagini. Pipeline fotogrammetrica*, in "Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei", Edizioni della Normale, Pisa, pp. 162-199.

Manferdini, Anna M.; Russo, Michele (2013). *Multi-scalar 3D digitization of Cultural Heritage using*

*a low-cost integrated approach*, in "Proc. of International Conference on Digital Heritage" Marseille, France, 1, pp. 153-160.

Pirotti, Francesco; Guarneri, Alberto; Vettore, Antonio (2013). *State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface*. In European Journal of Remote Sensing, n. 46, pp. 66-78.

Remondino, Fabio (2003). *From point cloud to surface: the modeling and visualization problem*, in Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34, 5/W10, pp. 1-11.

Remondino, Fabio (2011). *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*. In Remote Sensing, n. 3, pp. 1104-1138.

Snavely, Noah; Seitz, Steven M.; Szeliski, Richard (2006). *Photo tourism: exploring photo collections in 3D*, in "Proc. of SIGGRAPH'06" Boston, USA, pp. 835-846.

Velios, Athanasios; Harrison, John P. (2002). *Laser Scanning and digital close range photogrammetry for capturing 3D archeological objects: a comparison of quality and practicality*, in "Proc. of Conference in Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology (CAA 2011)" Oxford, UK, pp. 205-211.

Vergauwen, Maarten; Van Gool, Luc (2006). *Web-based 3D reconstruction service*. In Mach. Vis. Appl., vol. 17, n. 6, pp. 411-426.

Vosselman, George; Maas, Hans-G. (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing.