

Rilievo delle lastre tombali del Camposanto Monumentale di Piazza dei Miracoli a Pisa

Giovanni Pancani

Dipartimento di Architettura
Università degli Studi di Firenze

pagina a fronte

Fig. 1
Interno del
Camposanto
Monumentale di
Pisa, nell'immagine
la Galleria Nord

Abstract

The research is aimed at a new photogrammetric survey to tackle the restoration of the gravestones of the Pisa's monumental cemetery. It is situated in "Piazza del Duomo" and it occupies the north side of the extensive complex. The architecture opens into the square with a large marble wall interrupted with a series of blind arches. Inside, the building is arranged around a cloister (110 x 20 meters), over which the four galleries are overlooked, that are the illustrious Pisan burials. The cemetery, built from 1277, was completed in the mid-14th century. During the Second World War, it was heavily bombed and it suffered a fire that caused massive damage. The survey was addressed to using a methodological approach aimed at integrating multiple data acquisition system. Through a 3D laser scanner, a metric-morphological basis was developed on which the subsequent processing was calibrated. A photo capture campaign has been conducted to meet two different types of needs. In the first, a 2D orthophoto was created calibrating the straightened photographic images on the point cloud. In the second a series of partial 3D Mesh models have been performed using Structure from Motion technologies (SFM), where for better evaluation of gravestones degradation it is possible to observe the morphology along with the color.

Obiettivi del contributo

La ricerca si articola all'interno del più vasto interesse, che il gruppo di lavoro afferente al laboratorio di Rilievo dell'Architettura del Dipartimento di Architettura DiDA, nutre nei confronti del complesso monumentale di Piazza dei Miracoli a Pisa. Questa attenzione nei confronti dei monumenti pisani risale ormai ai primi anni duemila, periodo nel quale sono stati affrontati i rilievi del Battistero, di alcune porzioni esterne della Cattedrale e a scala maggiore dell'intero sito della Piazza dei Miracoli. Il caso in oggetto si riferisce al rilievo fotogrammetrico delle lastre tombali del Camposanto Pisano, resosi necessario per affrontare il restauro del monumento. Il rilievo è stato commissionato dall'Opera della Primaziale Pisana alla start-up SISMA (Sistemi Integrati di Monitoraggio Architettonico) S.r.l.s che è una



Fig. 2
Interno del Cortile
del Camposanto
Monumentale di Pisa

spin-off approvata dell'Università degli studi di Firenze. Lo scrivente, socio e membro del consiglio di amministrazione di SISMA S.r.l.s. è stato designato quale responsabile scientifico del rilievo della pavimentazione del Camposanto Pisano e in tale veste lo ha coordinato e ha sovrinteso alle operazioni di rilievo. Al termine dei lavori, gli elaborati ed in particolare gli ortofotopiani sono stati sottoposti al parere vincolante della commissione sulla direzione dei lavori di restauro sul Camposanto che ha approvato. I commissari, nominati dall'Opera della Primaziale Pisana assieme al comitato scientifico sono: Antonio Paolucci in qualità di Presidente, Antonino Caleca, Severina Russo, Mauro Matteini, Perla Colombini, Paolo Mandrioli, Ulderico Santamaria, Carlo Giantommasi e Gianluigi Colalucci.

Inquadramento geografico

Situato nella Piazza del Duomo, o "Campo dei Miracoli", come fu chiamato da Gabriele D'Annunzio, il Camposanto Monumentale¹ occupa il lato a nord del grande complesso pisano. Si apre sulla piazza con una grande parete marmorea intervallata da una successione di arcate cieche e due accessi, uno più semplice ed uno più solenne, sormontato da un'edicola con pinnacoli. All'interno, il corpo di fabbrica è organizzato attorno ad un grande cortile rettangolare (110 x 20 metri), che secondo la tradizione contiene la terra del monte Golgota portata direttamente dalla Terra Santa con la seconda crociata nel 1146. Sul cortile si affacciano i quattro grandi corridoi detti gallerie, la cui pavimentazione è costituita da lastre tombali marmoree, fra cui spiccano le sepolture dei più importanti personaggi dell'Ateneo, della vita civile e religiosa dell'urbe pisana.



Inquadramento storico

Il Camposanto, riconducibile ad un chiosco monumentale, fu edificato per volontà dell'Arcivescovo Federico Visconti a partire dal 1277, al fine di dare un'adeguata sistemazione alle sepolture sparse attorno alla Cattedrale. La sua costruzione comportò la demolizione dell'antico Battistero paleocristiano, rimasto ormai inutilizzato in seguito alla costruzione del nuovo Battistero di Diotisalvi, come confermano i resti ritrovati in seguito agli scavi del 1936 all'interno del cortile del Camposanto. A partire dal XIV secolo le gallerie del Camposanto furono affrescate con un straordinario ciclo pittorico iniziato ad opera del Traini e da Buffalmacco che vi dipinse il Trionfo della Morte ed il Giudizio Universale. Le Storie dei Santi Pisani furono in seguito affrescate dal Bonaiuti, dal Veneziano e da Spinello Aretino. Il ciclo di affreschi fu terminato da Benozzo Gozzoli che nella metà del Quattrocento vi realizzò Le Storie dell'Antico Testamento.

Nelle Gallerie del monumento vennero raccolti, nel corso dei secoli, numerosi reperti romani ed etruschi, ma è con l'inizio dell'Ottocento che la vocazione archeologica del Camposanto si afferma definitivamente facendone uno dei primi musei d'Europa.

Durante la seconda guerra mondiale, il Camposanto fu bombardato con granate incendiarie, che causarono ingenti perdite al patrimonio del monumento, compresa la completa distruzione della copertura. Il piombo fuso, colando sul pavimento e sugli affreschi li danneggiò in maniera pesante, come anche ebbe a descrivere efficacemente l'allora presidente dell'Opera della Primaziale Pisana, Giuseppe Ramalli².

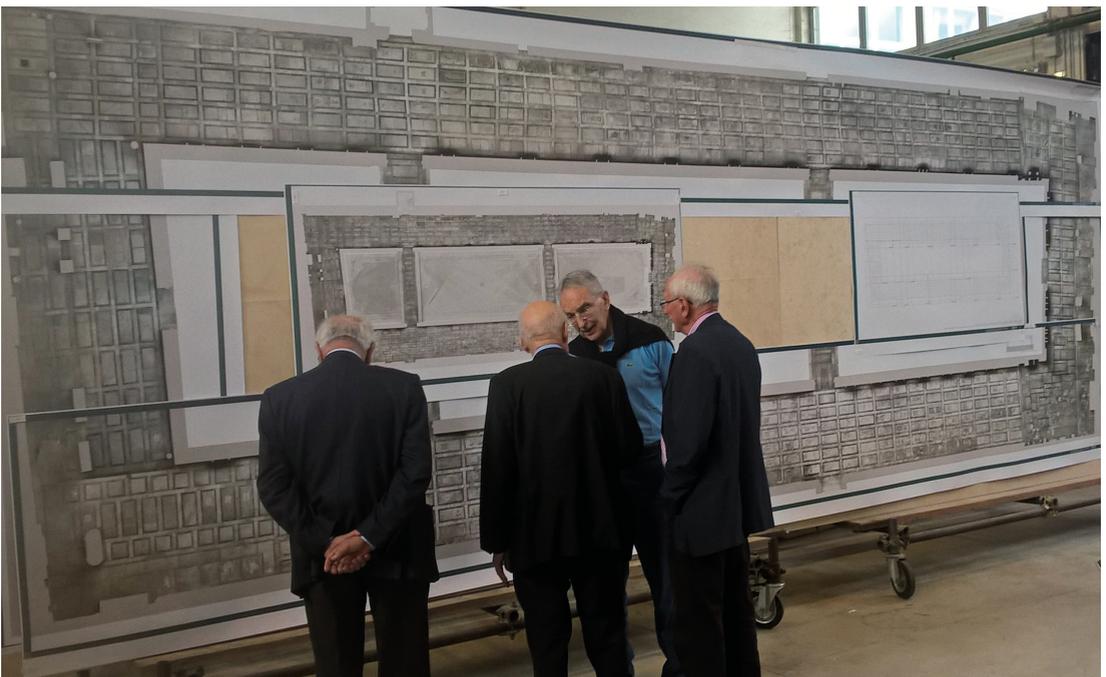
I pavimenti delle Gallerie, i cui marmi furono gravemente danneggiati dal

Fig. 3

Presentazione del Rilievo alla commissione per la Direzione dei Lavori di restauro del Camposanto Monumentale di Pisa

¹Argomento ampiamente trattato da numerosi studiosi, segnaliamo i contributi di: Baracchini C., Castelnuovo E., a cura di, *Il camposanto di Pisa*, Torino, Einaudi, 1996 - Opera della Primaziale Pisana, *Il Camposanto di Pisa, Rilievo di Massimo Carmassi*, Roma, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Libreria dello Stato, 1993.

²Ramalli G., *L'Opera della Primaziale e la guerra, in Pisa nel suo martirio e nella sua rinascita*, Comune di Pisa, Pisa, 1954.



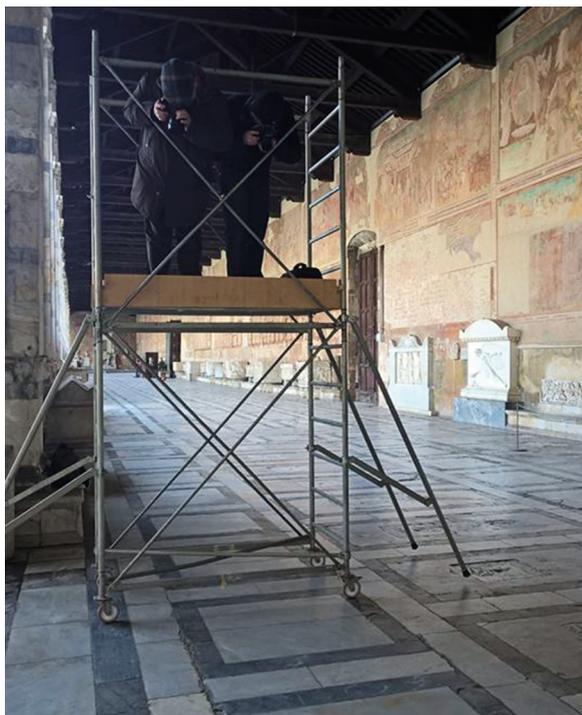
piombo fuso colato dal tetto durante l'incendio del 1944, sono stati una prima volta restaurati, tuttavia si evidenziano consistenti tracce dei danni subiti. Al fine di migliorare lo stato di conservazione delle superfici lapidee è stato pertanto programmato un nuovo ciclo di restauri, per il quale l'Opera della Primaziale Pisana ha commissionato il rilievo oggetto del presente studio.

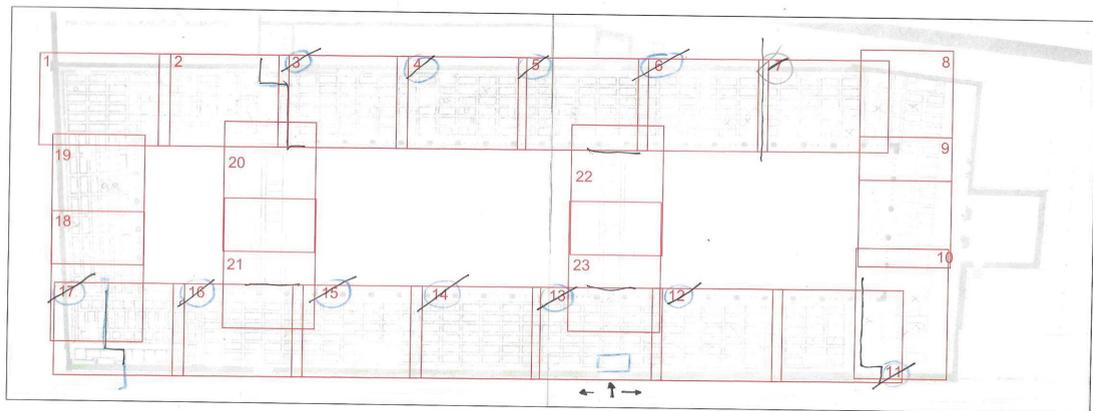
Metodologia seguita: acquisizione dei dati

L'importanza del monumento ha da subito reso indispensabile un'accurata pianificazione delle attività di rilievo e delle fasi di post produzione, con la consapevolezza che fosse lo strumento necessario per ottenere dati geometrici ed elaborati grafici di altissima affidabilità metrica, congiuntamente all'elevata capacità descrittiva degli ortofotopiani. Questa esigenza qualitativa, relativamente alla programmazione metodologica ci ha indotto a condurre un rilievo tale da ottenere un ingente mole di dati, rischiando talvolta, pur consapevolmente, di essere ridondanti. È stato quindi utilizzato un approccio metodologico volto all'integrazione di più sistemi di acquisizione, sia per i dati di carattere metrico-morfologico, sia per quelli di carattere fotografico. Per soddisfare gli aspetti qualitativi relativi alla rappresentazione fotografica sono state realizzate immagini che fossero in grado di raccogliere le informazioni ideone per le elaborazioni ortofotografiche di fotogrammetria piana ma anche per le elaborazioni 3D (Mesh model). La campagna per tali acquisizioni è stata realizzata con tipologie di

Fig. 4
La fase di acquisizione
del rilievo laser scanner

Fig. 5
Le riprese fotografiche
effettuate da un
trabattello mobile





- EA.FON (13-12-14-15-16-11-17)
 - LVV/PC -

- Photogram



ripresa orientate a soddisfare entrambi gli aspetti. Si è cercata una sequenza di inquadrature che non fosse eccessiva nel numero di immagini da elaborare attraverso programmi di fotogrammetria 2D, ma comunque sufficienti ad elaborare anche un modello 3D (Mesh model) di elevata qualità, in grado di offrire ulteriori informazioni tridimensionali relative alla geometria e alla spazialità dei particolari architettonici. L'integrazione dei due diversi contributi, seppure sviluppati ed elaborati in ambiti distinti, ha reso possibile, nella fase di post produzione, la costante verifica e la valutazione della qualità del lavoro svolto, grazie al controllo parallelo e incrociato dei risultati ottenuti con entrambe le tipologie di restituzione.

Il rilievo fotogrammetrico è stato referenziato tramite un accurato rilievo laser scanner, che a sua volta è stato appoggiato su di una poligonale topografica.

Ogni step del percorso di acquisizione, elaborazione e restituzione è stato eseguito rispettando un accurato protocollo di controllo, affinché i dati finali potessero essere certificati secondo le specifiche richieste dalla committenza. Tali specifiche richiedevano che il rilievo laser scanner avesse un livello di accuratezza sufficiente a garantire restituzioni fotogrammetriche in scala 1:20. Pertanto le scansioni della nuvola di punti sono state ac-

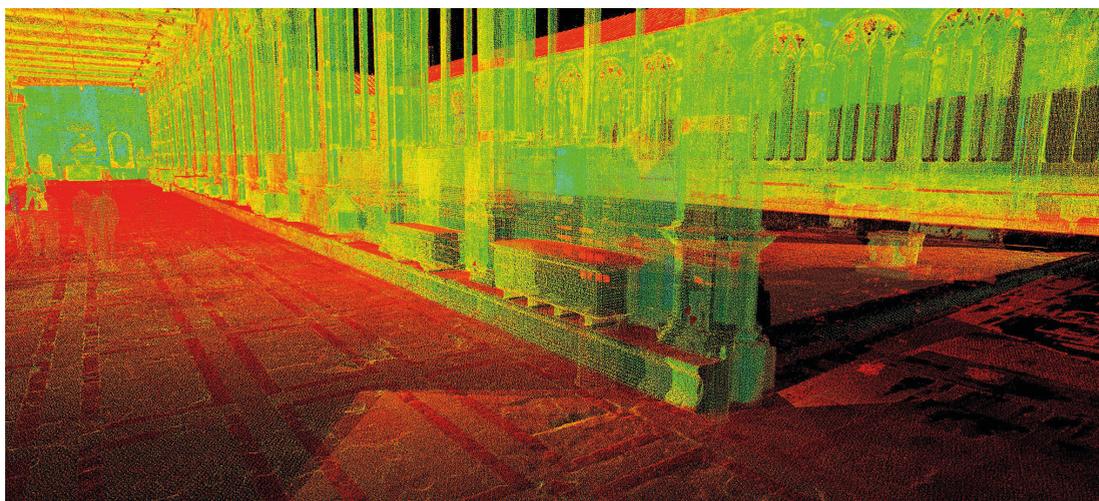
Fig. 6
 La monografia di catalogazione delle immagini, in alto il quadro d'insieme, in basso due dei fogli con indicate le singole immagini fotografiche acquisite

quisite con maglia media di 0,5 x 0,5 centimetri. La certificazione del rilievo richiesta ha previsto che la tolleranza massima di disallineamento delle sezioni fosse minore o uguale a +/- 1,5 centimetri. A tali parametri di accuratezza dovevamo inoltre rispondere anche i controlli incrociati eseguiti fra la poligonale topografica e la nuvola di punti, sia per quanto riguarda le misurazioni di controllo sui singoli target, sia per le misurazioni effettuate sui punti naturali dell'architettura. Inoltre le suddette tolleranze sono state verificate anche nelle operazioni di calibrazione fra le proiezioni della nuvola di punti ed il fotopiano delle lastre tombali.

Appare chiaro tuttavia che dovendo rispondere a parametri così stringenti per una così grande quantità di dati, ogni operazione del rilievo è stata condotta con la massima perizia. La cura della metodologia è stato uno degli imperativi durante tutto il lavoro, come anche la cura della sequenza delle operazioni di rilievo e di verifica. Bisogna inoltre segnalare che dovendo lavorare a museo aperto, il rilievo sul campo è stato realizzato durante la stagione invernale quando il numero dei visitatori è molto ridotto.

A questo riguardo, nella programmazione della sequenza metodologica, si è inoltre dovuto tenere conto delle condizioni di illuminazione, legate peraltro alla scelta di acquisire le immagini solo con luce naturale. Questa esigenza, assieme alle poche ore di luce solare presenti nella stagione invernale ha così prodotto un consistente allungamento dei tempi di lavoro rendendo necessarie molteplici giornate per le acquisizioni fotografiche. D'altra parte la scelta di eseguire riprese fotografiche con luce naturale è stata dettata dalla oggettiva difficoltà di utilizzare l'illuminazione artificiale in un progetto tanto esteso. Si è dovuto però tener conto delle variazioni della quantità e della qualità della luce, come per esempio per la difficoltà di mantenere la *temperatura colore*³ abbastanza stabile. Pertanto le riprese sono state eseguite in giornate nuvolose, limitando la ripresa delle immagini alle sole ore centrali della giornata, quando le ombre sono molto sfumate e le condizioni di luce subiscono variazioni contenute.

Fig. 7
Immagine delle
nuvola di Punti
registrata



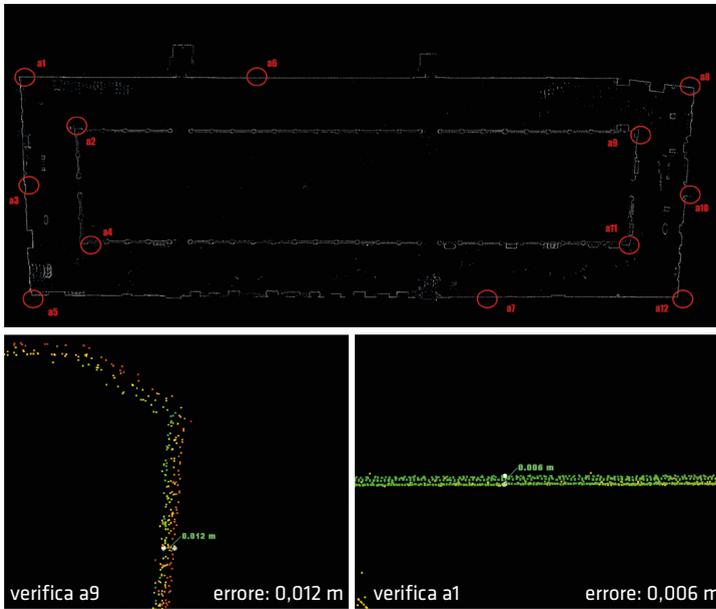


Fig. 8
Estratto dalla tavola di certificazione del rilievo laser scanner, nell'immagine in alto una sezione orizzontale e in basso sono riportati due dei punti di verifica

L'utilizzazione di un trabattello su ruote ha reso possibili inquadrature dall'alto pressoché perpendicolari alle lastre tombali, consentendo inoltre di lavorare in piena sicurezza con buone possibilità di movimento da parte degli operatori e con buona possibilità di scelta per le inquadrature migliori. La questione delle inquadrature e della *lunghezza focale* per le ottiche da utilizzare è stata affrontata al fine di ottimizzare i risultati, così da realizzare immagini in grado di essere utilizzate sia per la realizzazione degli ortofotopiani con tecniche di fotogrammetria piana, sia per disporre di immagini da elaborare con procedimenti di Structure from Motion (SfM)⁴. Le lastre tombali sono state fotografate ciascuna con almeno tre scatti, uno centrale e più ravvicinato per inquadrare la lastra principale e le sue cornici ai lati, mentre altri due scatti, sono serviti per riprendere da una posizione più elevata rispetto all'inquadratura precedente, quindi da una distanza lievemente maggiore, rispettivamente la metà destra e la metà sinistra, della tomba con un'inquadratura più ampia che comprendesse anche parte delle lastre tombali adiacenti. Questo set di immagini non solo ha consentito un'accurata capacità descrittiva delle lastre nella visione bidimensionale ma il campo di ripresa "residuo", che comprendeva appunto le tombe contigue, ha permesso l'acquisizione dei profili laterali dei marmi e delle loro lesioni, dati molto utili per una visione tridimensionale delle superfici marmoree e quindi per le elaborazioni 3D (Mesh model). Le immagini sono state realizzate utilizzando un obiettivo Sony SAL 24-70mm f/2.8 SSM Zeiss Vario Sonnar T*, con una fotocamera Sony Alpha 900 che dispone di un sensore Full-Frame 24x36mm con risoluzione di 24 megapixel. L'obiettivo è stato utilizzato prevalentemente alla focale di 35mm, laddove anche la consueta distorsione a barilotto delle lenti grandangolari risulta essere molto contenuta, l'apertura del diaframma è stata sempre

³Temperatura colore. "Per fornire una riproduzione ottimale, le pellicole a colori" o i sensori fotografici "debbono essere usate con una luce prossima alla temperatura di colore per la quale sono state tarate. Espressa in gradi kelvin (da Wiliam T. Kelvin) secondo la scala delle temperature assolute, la temperatura di colore di una sorgente di luce è quella alla quale occorre innalzare un corpo nero perché, partendo dallo zero assoluto, emetta un'energia spettrale uguale a quella della sorgente." In Forti G. 2006, *Fotografia, teoria e pratica della reflex*, p. 144, Roma, Editrice reflex.

⁴"Algoritmi che riescono a ricostruire da una sequenza di scatti fotografici i parametri inteni della macchina fotografica e la posizione nello spazio dei punti omologhi" Inzerillo L., Santagati C. 2013, *Il progetto del rilievo nell'utilizzo di tecniche di modellazione dense stereo Matching*, Disegnare idee immagini, Anno XXIV, n. 47, dicembre 2013, Roma, pp 82-91.

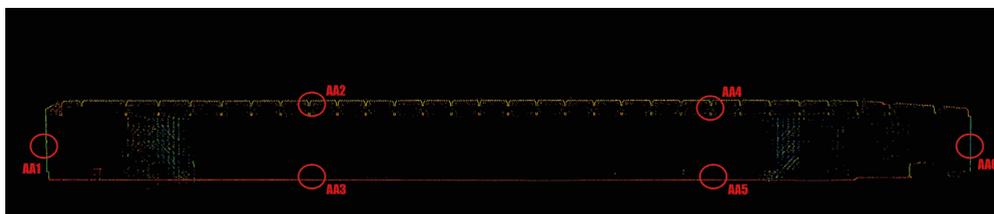
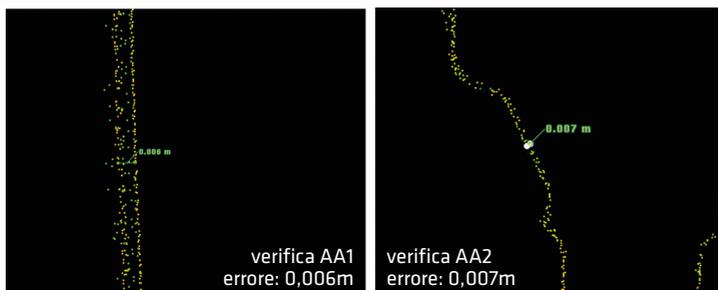


Fig. 9
Estratto dalla tavola di certificazione del rilievo laser scanner, nell'immagine in alto una sezione verticale e in basso sono riportati due dei punti di verifica



impostata con almeno uno stop in meno rispetto all'apertura massima disponibile, mettendo in atto tutti i comportamenti tecnici necessari per la realizzazione di immagini "native" di elevata qualità.

Il Camposanto Monumentale conta un numero totale di 581 tombe o lastre sepolcrali con una superficie di circa 3060 metri-quadri, pertanto in considerazione delle grandi dimensioni del monumento e della notevole quantità di immagini da acquisire, è stato necessario, già dal momento dello scatto, catalogare e individuare le immagini nella loro corretta posizione, con un'accurata "monografia" per la classificazione delle foto.

Le fotografie delle lastre sepolcrali relative alle quattro gallerie che formano il chiostro del Camposanto, sono state catalogate in 19 fogli, ognuno corrispondente ad una porzione di pavimento su cui mediamente sono presenti 6 file da 6 tombe ciascuna e sono così suddivisi: Galleria Nord (fogli 1-7, 240 tombe), Galleria Est (fogli 8, 9 e 10, con 54 tombe di cui 3 nella pedana rialzata), Galleria Sud (fogli 11-17, 209 tombe) e Galleria Ovest (fogli 18-19 con 48 tombe). Altri quattro fogli sono stati utilizzati per catalogare le immagini relative alle due passerelle nel cortile del chiostro, dove sono presenti 30 lastre sepolcrali, divise equamente nei due passaggi esterni, la passerella ovest e quella est (fogli 20-23).

Metodologia seguita: elaborazione dati e restituzione

La fase di restituzione ed elaborazione dati è stata affrontata in primo luogo con la messa a registro della nuvola di punti, effettuando registrazioni appoggiate sulla poligonale topografica, verificate con un protocollo di certificazione basato su due principi:

Il primo verifica la corrispondenza fra i target misurati nella poligonale topografica e quelli presenti nella nuvola di punti, controllando che gli eventuali errori siano inferiori a 10 mm. Il secondo, andando a verificare la corrispondenza dei *fili di sezione*. Tale metodo consiste nel prendere una nuvola di punti, comprendente un certo numero di scansioni registrate, su

⁵ Per la verifica delle risoluzioni alle varie scale si fa riferimento ai seguenti testi e normative: Dovendo stabilire le tolleranze di un rilievo non potremmo che rifarci a principi legati alle capacità percettive, alla manualistica e alle normative (ISO) poiché la normativa italiana in materia risulta piuttosto lacunosa. Quale bibliografia di riferimento si veda: Docci M., Maestri D. (2010). Manuale di rilevamento architettonico e urbano, Bari, laddove vengono stabiliti gli errori ammissibili (grado di affidabilità) relativi ai grafi cismo alle varie scale indicandoli nella tabella di seguito:

Scala 1: 200 ± 40÷60 mm; Scala 1:100 ± 20÷30 mm; Scala 1: 50 ± 10÷15 mm; Scala 1: 20 ± 4÷6 mm;

Scala 1: 10 ± 2÷3 mm. La norma ISO 4463-3 relativa alla precisione delle dimensioni dei disegni di rilievo stabilisce i limiti di accuratezza in: Scala 1: 200 ± 50 mm; Scala 1: 100 ± 25 mm; Scala 1: 50 ± 12 mm.

⁶ In: Pancani G. (2011), *Lo svolgimento in vera grandezza delle volte affrescate delle sale dei quartieri al piano terreno di Palazzo Pitti a Firenze*, in *Il Disegno delle trasformazioni*, atti delle Giornate di Studio, Clea Edizioni, Napoli.

cui eseguire almeno tre sezioni che siano fra loro perpendicolari, una per asse cartesiano e che comprendano parti rilevanti e significative della registrazione. Da ogni sezione estratta si verifica che i punti allineati lungo il profilo della sezione di ogni scansione, che chiameremo "Fili", siano per tutte le scansioni presenti nella registrazione corrispondenti o tendenti al medesimo profilo, e che gli eventuali disallineamenti non siano superiori alle tolleranze fissate per gli errori massimi ammissibili alla scala di restituzione scelta per il rilievo⁵.

In seguito alla registrazione della nuvola di punti con cui è stato elaborato il modello metrico del rilievo, sono state affrontate le elaborazioni delle immagini fotografiche per ottenere le restituzioni dei modelli qualitativi, la restituzione 2D con l'ortofotopiano del pavimento e i vari modelli SfM 3D (Mesh model).

A questo fine, sono state preventivamente equalizzate tutte le immagini fotografiche, effettuando le correzioni necessarie per l'esposizione delle immagini, per la temperatura di colore e per gli altri parametri necessari a renderle quanto più omogenee possibile. Le 2300 immagini realizzate sono state preprocessate con il fine di limitare gli eventuali aggiustamenti successivi alle elaborazioni 2D e 3D (Mesh model).

Per la restituzione con fotogrammetria piana, si è proceduto secondo una metodologia ormai largamente consolidata, basata sul raddrizzamento, la calibrazione e la mosaicatura delle immagini fotografiche, sull'immagine raster (ortho-image), ottenuta dalla proiezione in vera grandezza della superficie da processare⁶. Questo procedimento consente di ottenere elaborati di elevata qualità ed estremamente affidabili, grazie al controllo ed alla calibratura, che può essere condotta sia con semplici punti di controllo, sia utilizzando la digitalizzazione al filo di ferro delle superfici da fotoraddrizzare. Esiste tuttavia la possibilità che si verifichino degli errori e delle

Fig. 10
Immagine della digitalizzazione al filo di ferro dei profili delle lastre tombali

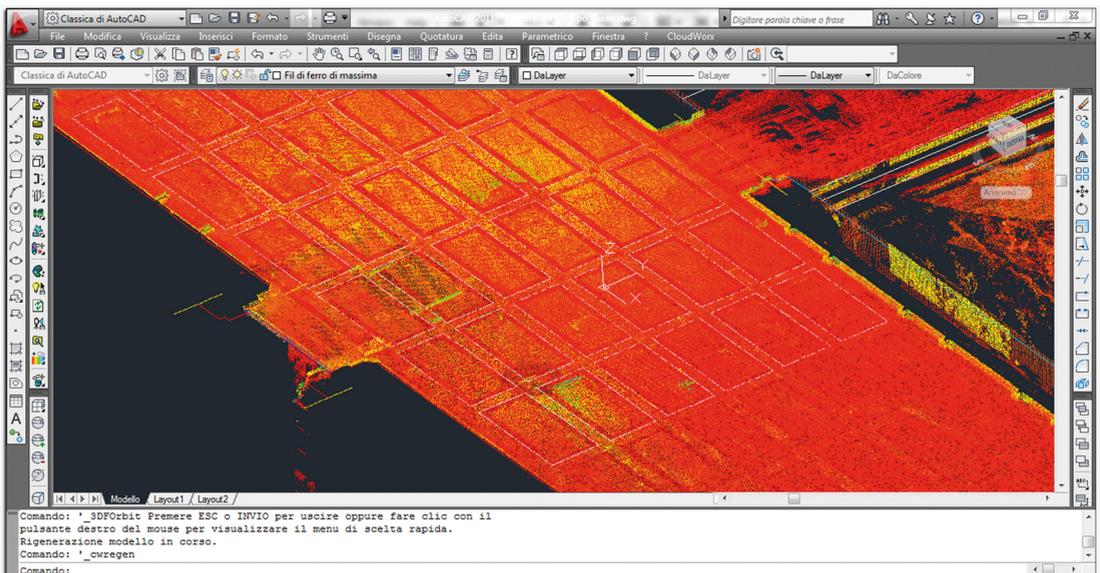
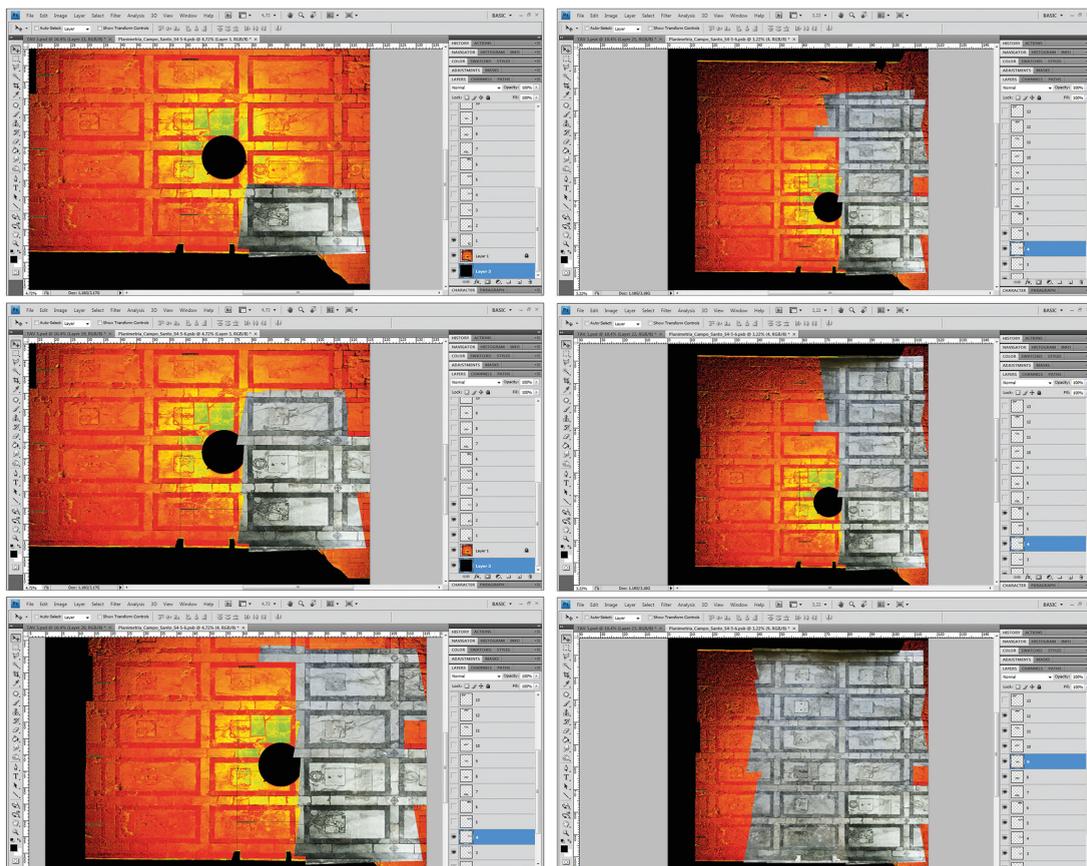


Fig. 11
Avanzamento del lavoro per la realizzazione dei fotopiani, con le fasi di fotoraddrizzamento, calibrazione e mosaicitura delle immagini. Per il controllo costante del lavoro sono sempre presenti nel file la rasterizzazione della proiezione in scala estratta dalla nuvola di punti e la digitazione al filo di ferro

imprecisioni legate soprattutto alla perizia ed alla preparazione dell'operatore. Un errore nella digitalizzazione del filo di ferro può compromettere la calibrazione, ragione per cui è sempre buona norma effettuare controlli incrociati con l'immagine raster.

La risoluzione del fotopiano è evidentemente funzione della qualità e della risoluzione delle acquisizioni, considerando anche che con inquadrature pressoché perpendicolari si ha una perdita di risoluzione modesta, circa il 20%. Possiamo comunque stabilire che seppure il grado di affidabilità metrica non vari, poiché determinato dai presidi di controllo come il rilievo laser scanner e il rilievo topografico, al variare della risoluzione delle immagini può cambiare il grado di risoluzione e quindi la capacità descrittiva del fotopiano finale.

A questo riguardo occorre fare alcune considerazioni legate alla capacità di risoluzione e di visualizzazione di un ortofotopiano, nonché alla stampa degli elaborati che dovranno seguire alcune regole particolarmente cogenti come nel caso oggetto di studio. La visualizzazione nonché la stampa sono di solito realizzate in modo da consentire un'agevole consultazione del materiale prodotto. Per apprezzare tutta la pavimentazione del Camposanto nel suo insieme, è stato necessario realizzare un quadro d'Unione in scala 1:50. Questa tipologia di stampa, ma anche di realizzazione dei fotopiani, non consente però di apprezzare sia la complessità decorativa



che caratterizza molte lastre, sia lo stato del degrado delle superfici marmoree. Pertanto, ogni galleria del Camposanto è stata rappresentata singolarmente con tavole in scala 1:20. Mentre alcune lapidi, in particolare le lastre tombali con epigrafi e/o scolpite con le figure dei giacenti sono state sviluppate secondo modelli SFM 3D (Mesh model) con risoluzioni adeguate per la rappresentazione alla scala 1:5.

Per la risoluzione delle immagini sono stati rispettati precisi parametri legati alla risoluzione di stampa che prevedono uno standard di 300 pixel per pollice. Tuttavia è necessario precisare che per ottenere questo standard di definizione alle varie scale, senza perdere qualità, è necessario che le immagini dei fotopiani abbiano una risoluzione che rispetti le seguenti equivalenze:

Nella scala 1:50 un metro reale è rappresentato in 2 cm di stampa. Considerando che la conversione fra pollici e cm è uguale a 1 pollice = 2,54 centimetri, ne risulta che la risoluzione per la stampa alla scala corrispondente è uguale a 118,11 pixel per centimetro, arrotondati a 120. Da questo ne consegue che, se nella scala 1:50, 2 cm servono per rappresentare un metro di superficie scalata, nel fotopiano le immagini corrispondenti devono avere una risoluzione di 240 pixel per rappresentare un metro della stessa superficie reale, ovvero 2,4 pixel per centimetro, arrotondato per eccesso a 3 pixel per centimetro, di conseguenza ne consegue che per:

la scala 1:50 = occorrono 3 pixel/cm di oggetto reale;

la scala 1:20 = occorrono 8 pixel/cm di oggetto reale;

la scala 1:10 = occorrono 16 pixel/cm di oggetto reale;

la scala 1:5 = occorrono 32 pixel/cm di oggetto reale.

Bisogna inoltre considerare che durante le elaborazioni necessarie per ottenere i fotopiani bidimensionali e le elaborazioni 3D (Mesh model), le immagini tendono a perdere di risoluzione. È tuttavia evidente che durante la fase di acquisizione la misurazione della porzione di superficie da inquadrare è empirica, quindi per raggiungere le risoluzioni desiderate è buona norma aumentare le risoluzioni dello schema di almeno il 30%.

Per le attività di 3D photo modeling Structure from Motion (SfM), è stato utilizzato uno dei software più diffusi, *Agisoft Photoscan*. Il processo di elaborazione fornisce modelli tridimensionali triangolati da sequenze di

Fig. 12
Immagine di una delle 18 tavole in scala 1:20 (la tav.3G) stampate nel formato AO

Fig. 13
Immagine della tavola in scala 1:50 con tutto il rilievo delle lastre tombali del Camposanto

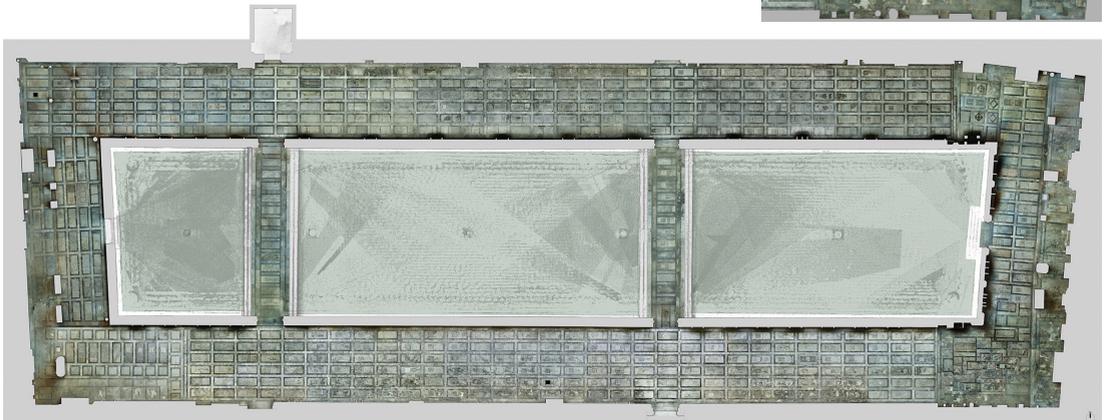
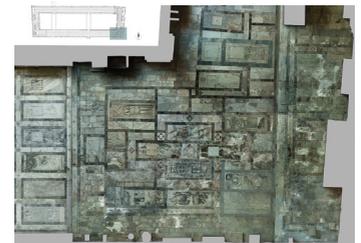
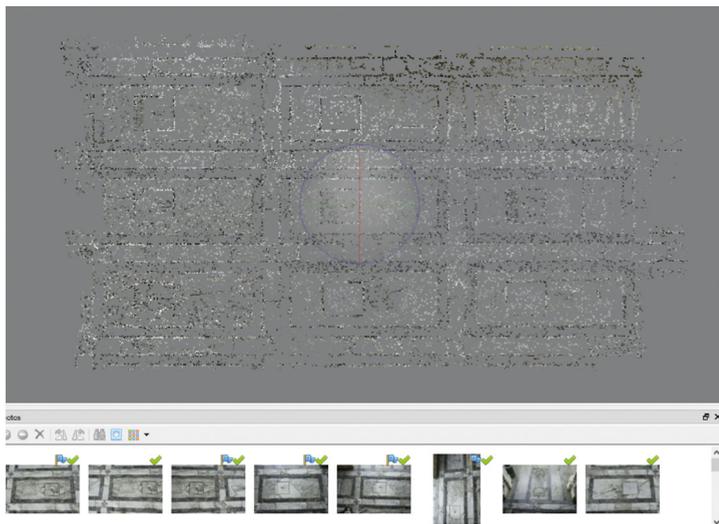


Fig. 14
Particolare della tavola 3G
relativo ad una tomba del
rilievo

Fig. 15
Particolare, della tomba di
cui alla Fig. 14, per apprezzare
il livello di risoluzione

Fig. 16
Elaborazione del modello
formato da un gruppo di 9
tombe della nuvola di punti
rada (*sparse cloud*)



immagini bidimensionali. Attraverso questa attività sono state allineate le immagini di 9 tombe alla volta, con cui è stata ottenuta una nuvola di punti rada detta anche *sparse cloud*. Per effettuare questa attività il software ha utilizzato algoritmi che possono processare le analogie fra i colori ed i punti di contrasto presenti nell'immagine fotografica, in virtù di cui riconosce i punti omologhi fra le varie immagini utilizzate. Si è poi passati all'elaborazione di una nuvola di punti fitta, *dense cloud*, processo durante il quale sono state aggiunte le informazioni necessarie a fornire una descrizione accurata del soggetto, che erano state tralasciate nella prima fase per evitare un appesantimento dei dati di calcolo. Il passaggio successivo è l'elaborazione della nuvola di punti fitta in modello 3D mesh ottenuto con il software Geomagic Wrap®. Infine, il modello mesh è stato nuovamente importato in Photoscan per essere texturizzato. Le fotografie impiegate come già anticipato, sono le stesse utilizzate per le elaborazioni di fotogrammetria piana. Si tratta di immagini scattate ad altissima risoluzione, di circa 18 pixel per centimetro, che hanno consentito l'elaborazione di una mesh estremamente accurata e una texture delle superfici coerenti e conformi allo stato di fatto.

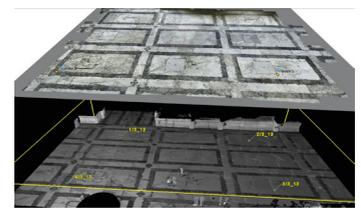
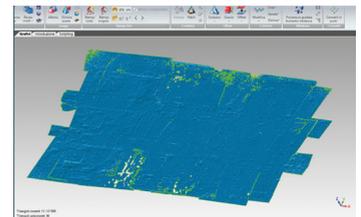
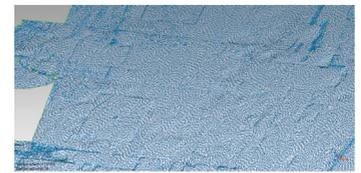
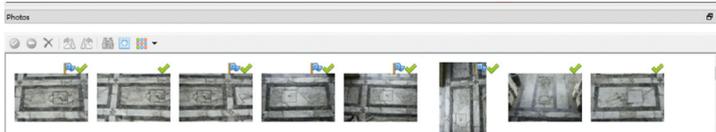
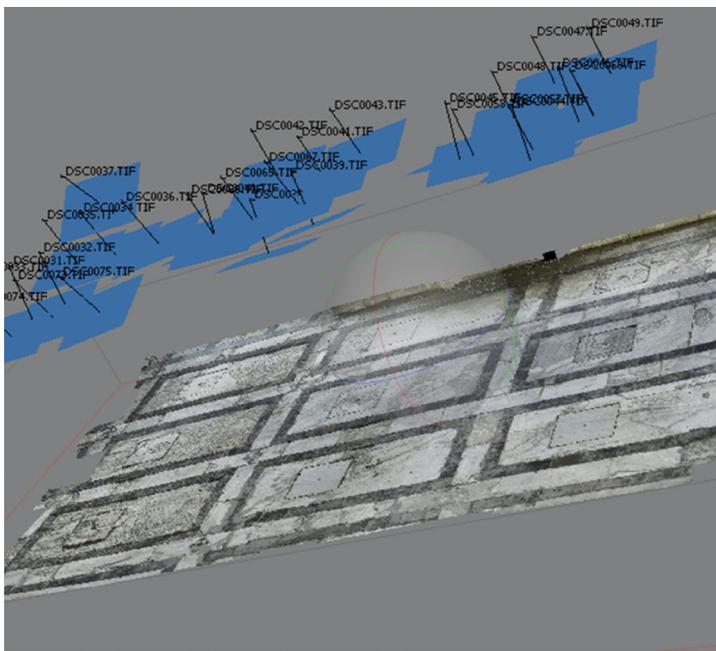
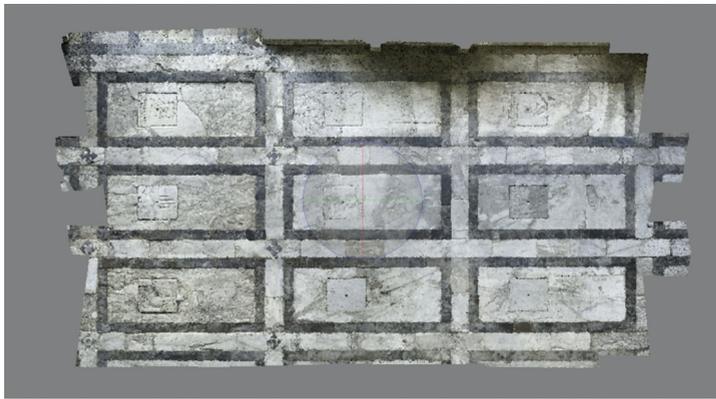


Fig. 17
Elaborazione della nuvola di punti densa (*dens cluod*)

Fig. 18
Visualizzazione del modello elaborato con evidenziati i punti di ripresa delle immagini

Fig. 19
Ottimizzazione del modello mesh attraverso l'utilizzo del software Geomagic Wrap®

Fig. 20
Individuazione delle coordinate spaziali sia nella nuvola di punti del rilievo laser scanner e nel modello 3D mesh model generato in Geomatic Studio

Per scalare il modello 3D ottenuto attraverso Photomodeling sono state individuate le coordinate spaziali di una serie di punti di riferimento specifici della nuvola di punti già elaborata attraverso il rilievo laser scanner; i medesimi punti sono stati individuati nel modello di photoscan ai quali sono stati assegnati i valori delle coordinate già determinate nella nuvola

di punti. In questo modo il primo modello è stato perfettamente allineato sulle dimensioni reali registrate dalla nuvola di punti, consentendo di ottenere una *mesh* scalata non più in pixel ma secondo un'unità di misura di lunghezza (metri) e permettendo l'esportazione in orto-immagini che tengano in considerazione il rapporto pixel/cm.

Dopo aver referenziato il modello in Photoscan è stato possibile controllare, l'errore risultante assoluto, rispetto alla sua posizione nello spazio.

Grazie all'utilizzo di programmi specifici e dedicati a questo tipo di attività è stato possibile realizzare un modello tridimensionale metricamente affidabile, sul quale è stata ricreata la texture di tutta l'area.

Risultati conseguiti

Questo progetto ha consentito alla committenza di dotarsi degli opportuni strumenti per affrontare il restauro delle lastre tombali del Camposanto Pisano in questo senso debbono intendersi l'esteso rilievo laser scanner, l'ortofotopiano in scala 1:20 e i modelli della pavimentazione ottenuti con tecniche 3D photo modeling.

L'ortofotopiano è stato realizzato ad elevata definizione e la sua stampa in formato cartaceo, per contratto è stata eseguita in scala 1:20, ma l'altissima definizione dei file nativi (foto) e la loro oculata elaborazione in grado di contenere le perdite di informazioni durante le operazioni di fotoraddrizzamento e calibrazione, ha tuttavia permesso di ottenere file in grado di sopportare tranquillamente stampe in scala 1:10.

Con i processi 3D photo modeling Structure from Motion (SfM) sono stati generati 157 modelli, che mediamente contengono nove tombe ciascuno, risultato di grande interesse per la realizzazione di fotopiani di aree con geometrie particolarmente complesse e soprattutto per la valutazione congiunta della geometria assieme al cromatismo delle molte aree lesionate che il pavimento del Camposanto Monumentale Pisano presenta. La committenza aveva infatti richiesto già dal bando che il fotopiano fosse arricchito da elaborati in grado di fornire ulteriori informazioni rispetto ad un "normale" fotopiano. La geometria derivata dalle scansioni laser scanner non era però in grado di restituire i gradi di approfondimento richiesto, poiché le maglie di acquisizione strumentali non potevano spingersi molto al disotto dei due punti per centimetro senza incorrere in eccessi di rumore digitale. D'altra parte le dimensioni del monumento non consentivano a costi accettabili, l'utilizzazione di strumentazioni laser scanner per acquisizioni più raffinate. È sembrato quindi un buon compromesso utilizzare il 3D photo modeling Structure from Motion (SfM) quale strumento di approfondimento metrico morfologico e cromatico idoneo a rispondere alle esigenze della committenza.

Aspetti innovativi ed elementi originali

La gestione di una cospicua quantità di dati, conservandone le elevate qualità descrittive, può essere considerata fra gli elementi degni di nota, come al pari della realizzazione di un'unica campagna fotografica in grado di ri-

Fig. 21
Modello di dettaglio
di una tomba



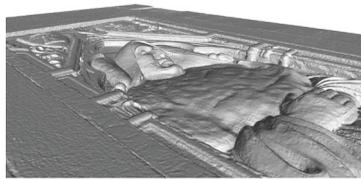
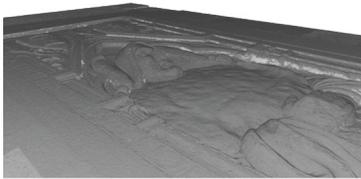


Fig. 22
Modello di dettaglio di una tomba, nelle tre viste wireframe, mesh, e texturizzato

spondere ad esigenze qualitativamente elevate ma con forme di elaborazione diverse. Se da una parte è possibile ritenere poco comune la realizzazione di due diverse tipologie di elaborazioni per il materiale fotografico, dall'altra si terrà conto che la loro concezione è subordinata a scopi diversi, la realizzazione dell'ortofotopiano in un caso e la realizzazione di piccoli modelli per la valutazione dei particolari morfologici e del degrado nell'altro. Talvolta, tuttavia, i dati sono stati contaminati come nel caso dell'impiego dei modelli 3D photo modeling SFM per ottenere particolari zone del fotopiano.

Bibliografia

Bandiera A., Beraldin J. A., Gaiani M. 2011, *Nascita ed utilizzo delle tecniche digitali di 3D imaging, modellazione e visualizzazione per l'architettura e i beni culturali*, in Ikhnos, «Annale di Analisi grafica e Storia della Rappresentazione», Lombardi editore, Siracusa pp. 81-134.

Baracchini C., Castelnuovo E. 1996, a cura di, *Il Camposanto di Pisa*, Einaudi, Torino.

Bini M., Bertocci S. 2012, *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, De Agostini Scuola S.p.A., Novara.

Cipriani L., Fantini F., Bertacchi S. 2014, *Metodologie di rilevamento digitale tridimensionale: confronti e integrazioni*, «Bollettino degli Ingegneri», vol 11, pp. 918.

Cipriani L., Fantini F. 2015, *Modelli digitali di Structure from Motion per la costruzione di un sistema conoscitivo dei portici di Bologna*, «Disegnare idee immagini», Anno XXVI, n. 50, Roma, pp 70-91.

Dellepiane M., Dell'Unto N., Callieri M., Lindgren S., Scopigno R. 2013, *Archaeological excavation monitoring using dense stereo matching techniques*, in «Journal of Cultural Heritage», 14(3), pp. 201-210.

Docci M., Gaiani M., Maestri D. 2011, *Scienza del disegno*, De Agostini Scuola S.p.A., Novara.

Docci M., Maestri D. 2010, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Bari.

Forti G. 2006, *Fotografia, teoria e pratica della reflex*, Editrice reflex, Roma.

Gaiani M., Apollonio F.I. 2015, *Innovative approach to the digital documentation and rendering of the total appearance of ine drawings and its validation on Leonardo's Vitruvian Man*, «Journal of Cultural Heritage», 16, pp. 805 - 812.

Gaiani M., Apollonio F.I. 2015, *Innovative approach to the digital documentation and rendering of the total appearance of ine drawings and its validation on Leonardo's Vitruvian Man*, «Journal of Cultural Heritage», 16, pp. 805 - 812.

Kersten T., Stallmann D., (2012), *Automatic texture mapping of architectural and archaeological 3d models*, in «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XXXIX-B5, pp. 273-278.

Inzerillo L., Santagati C. 2013, *Il progetto del rilievo nell'utilizzo di tecniche di modellazione dense stereo Matching*, in «Disegnare idee immagini», Anno XXIV, n. 47, Roma, pp 82-91 (ISBN 978-88-492-1652-3)

Nguyen Hoahi-Minh, Wunsche B., Delmas P., Lutteroth C. 2012, *3D Models from the Black Box: Investigating the Current State of Image-Based Modeling*, in Proceedings of the 20th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG, Pilsen, Czech Republic.

Pancani G. 2011, *Lo svolgimento in vera grandezza delle volte affrescate delle sale dei quartieri al piano terreno di Palazzo Pitti a Firenze*, in *Il Disegno delle trasformazioni*, atti delle Giornate di Studio, Clean Edizioni, Napoli.

Pancani G. 2016, *Piazza dei Miracoli a Pisa: il Battistero Metodologie di rappresentazione e documentazione digitale 3D*, Edifir, Firenze.

Pierrot-Deseilligny M., De Luca L., Remondino F. 2011, *Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation*, Proc. CIPA.

Restuccia F., Galizia M., Santagati C. 2012, *Urban and Architectural Design of the "Piazza del Governo" in Enna*, «Journal of Literature and Art Studies», vol 2 (6), pp. 606-621.