

Digitalizzazione tridimensionale di apparati musivi

3D digitization of mosaics

Anna Maria Manferdini, Università di Bologna

Luca Cipriani, Università di Bologna

Abstract

Il contributo presenta alcuni risultati dell'applicazione di metodologie di rilievo digitale 3d applicate a Beni Culturali. I casi di studio presentati appartengono al vasto repertorio di mosaici di Ravenna. L'interesse per l'applicazione di metodi e strumenti di rilievo digitale tridimensionale a tale repertorio deriva dai caratteri peculiari degli apparati musivi rispetto all'indagine digitale, soprattutto relativi alla loro complessità multi-scalare, e anche rispetto all'utilizzo dei modelli, in sistemi informativi e ricostruzioni digitali, per documentarne la conservazione e per il restauro virtuale.

In this paper we present a methodology developed to access to Cultural Heritage information using digital 3d reality-based models as graphic interfaces. The case studies presented belong to the wide repertoire of mosaics of Ravenna. One of the most peculiar characteristics of mosaics that often limits their digital survey is their multi-scale complexity; nevertheless their models could be used in 3d information systems, for digital exhibitions, for reconstruction aims and to document their conservation conditions in order to conduct restoration interventions in digital environments aiming at speeding and performing more reliable evaluations.

Keywords: reality-based 3D modeling, mosaics, documentation, digitization.

Introduzione

Il contributo si inserisce in un quadro generale di ricerca relativo alla individuazione di nuove modalità e metodi per la fruizione e gestione dei Beni Culturali, basati sull'integrazione di tecnologie digitali differenti. La diffusione di queste, e in particolare delle relative metodologie di acquisizione dei dati, offre infatti nuove opportunità ad Enti e Istituzioni che sono chiamati da un lato a preservare e promuovere il loro patrimonio artistico, storico e culturale, e dall'altro a comunicare e condividere le conoscenze tra utenti, operatori economici e studiosi. Tuttavia l'adozione delle procedure digitali come pratica standard per raccogliere i dati sul patrimonio culturale, risulta ancora poco diffusa. Le ragioni di questa mancanza sono legate principalmente ai costi elevati connessi alle tecnologie digitali - particolarmente alti nei momenti di sperimentazione di nuove tecnologie ma progressivamente decrescenti con la loro diffusione - e soprattutto all'assenza di procedure codificate in grado di garantire affidabilità dei risultati e facilità nella gestione e scambio dei dati. In merito a quest'ultimo aspetto, un ulteriore ostacolo alla diffusione delle tecnologie digitali nel campo dei Beni Culturali deriva dalle difficoltà tecniche della rilevazione digitale di manufatti e opere, che presentano casi riconducibili a moltissime tipologie caratterizzati da evidenti complessità intrinseche e peculiarità. Un ulteriore livello di complessità è inoltre generato dalle differenti esigenze riferibili alle classi differenziate di utenti dei dati, riferibili a tutti i soggetti interessati alla conservazione delle opere - committenti, imprese di manutenzione e restauro, Enti di controllo, ecc. - e a tutti quelli legati alla fruizione delle opere stesse; settore questo particolarmente sensibile soprattutto quando le opere stesse risultano difficilmente accessibili o diffuse in ambiti territoriali ampi e isolati.

Recenti ricerche nel campo della modellazione 3d, nella visualizzazione e nelle tecnologie Internet, hanno dimostrato l'efficacia della comunicazione mediante l'utilizzo di modelli 3d, concepiti come repliche digitali della realtà, nei quali i dati possono essere utilizzati per visualizzare e condividere diversi tipi di informazioni attraverso interfacce grafiche altamente intuitive. Si rileva tuttavia che, nonostante le tecnologie e i metodi relativi siano stati notevolmente sviluppati e migliorati negli ultimi due decenni, la mancanza di una procedura codificata in grado di garantire la restituzione di dati tridimensionali con il livello qualitativo richiesto - le informazioni acquisite devono infatti essere utilizzate in contesti diversi e per diversi scopi che possono cambiare nel tempo - e i relativi costi non favoriscono la sistematica acquisizione digitale dei Beni Culturali, soprattutto per ampi patrimoni e collezioni.

La ricerca condotta si inserisce in questo panorama di studi sperimentando metodologie e sistemi per l'acquisizione digitale dei dati, indagando una particolare categoria di opere, i mosaici, caratterizzati da un'elevata complessità geometrica e materica. I casi di studio indagati appartengono al vasto repertorio musivo di Ravenna, che presenta opere che vanno dal periodo bizantino a quello moderno.

Uno dei caratteri che rendono i mosaici particolarmente interessanti per la caratterizzazione dell'indagine 3d digitale, è la loro complessità geometrica e materica, valutata secondo due diversi punti di vista, di cui il primo propedeutico al successivo. Nella dimensione complessiva, di inserimento del mosaico nel contesto architettonico, si rileva che in genere coprono pavimenti o pareti caratterizzati da geometrie bidimensionali assimilabili a superfici piane o curve (pareti, pavimenti, volte, archi, colonne, ecc.) che tuttavia, per effetto dell'inevitabile degrado, possono presentare variazioni geometriche diffuse o puntuali. Appare poi importante osservare che in alcuni casi i mosaici avvolgono completamente lo spazio interno, e in questo caso, attraverso la loro rappresentazione digitale, viene ricostruita l'immagine dell'intero spazio architettonico. L'osservazione di dettaglio della superficie dei mosaici, costituita da tessere di geometria spesso molto complessa, evidenzia elementi di dimensioni variabili e irregolari, uniti a non complanarità e occlusioni, che impongono l'adozione di strumenti e procedure diverse e maggiormente accurate rispetto al rilievo generale.

In aggiunta a questi aspetti di natura geometrica, una ulteriore difficoltà è data dalle caratteristiche radiometriche delle tessere, realizzate utilizzando generalmente materiali traslucidi (come vetro o marmo) o con finitura superficiale metallica (foglia oro).

L'analisi, poi, delle procedure tradizionali finora adottate nel restauro dei mosaici evidenziano ulteriormente le potenzialità offerte dall'utilizzo dei modelli digitali 3d. Nel secolo scorso, infatti, in occasione di alcune specifiche campagne di restauro, la Soprintendenza di Ravenna richiese la costruzione di calchi in gesso, per aggiungere coerenza spaziale alle indagini pittoriche e con il fine di superare le inevitabili sintetizzazioni di informazioni derivanti dalle rappresentazioni grafiche bidimensionali (elaborati tecnici, indagini pittoriche o fotografiche). Appare oggi evidente la sostituibilità dei calchi in gesso con i modelli digitali. Si rileva anche che alcune di queste indagini pittoriche - i cosiddetti "cartoni musivi" - mostrano una evidente capacità, e precisione, nella riproduzione di forme, colori, trasparenze e riflessioni, e sono considerati, a loro volta, opere d'arte da esporre. La possibilità di sovrapporre questi cartoni alla geometria 3d di mosaici in ambiente digitale rappresenta una ulteriore opportunità per stratificare diversi tipi di informazioni su un singolo documento (Fig. 1).

Obiettivi

Il contributo vuole mostrare i risultati di una ricerca condotta attraverso la sperimentazione di differenti sistemi e strumenti, con il fine di individuare la metodologia digitale più appropriata di acquisizione dei dati - specificando e sistematizzando la relativa procedura da adottare - al fine del rilievo e della caratterizzazione geometrica e materica dei mosaici. Obiettivo principale dell'indagine è documentare le condizioni di conservazione, costruendo un modello di riferimento digitale che consenta di simulare differenti interventi di restauro in ambiente digitali, per valutarne gli esiti e rendere maggiormente affidabile la scelta dell'intervento; i dati vengono anche predisposti in modo che - per ricaduta - possano essere utilizzati all'interno di collezioni digitali e sistemi informativi.

La calibrazione e definizione delle esigenze di utilizzo dei dati acquisiti pone alcuni interrogativi: se infatti il limite di rilievi e rappresentazioni tradizionali consiste principalmente nella sintesi eccessiva di descrizione - con la conseguente, significativa, riduzione delle informazioni - l'incremento di dettaglio dell'indagine comporta un notevole incremento dei dati e delle relative dimensioni, con le conseguente difficoltà di utilizzo delle informazioni, soprattutto ai fini della fruizione. Resta il fatto che la costruzione di uno strumento utile per analizzare i problemi di conservazione delle opere d'arte deve tendere ad ottenere un'elevata definizione ed accuratezza del modello 3d. Ciò è particolarmente evidente nel caso dei mosaici, che uniscono all'indagine sulla superficie anche quella sulla struttura di supporto, spesso costituita da stratificazioni successive che risultano parte integrante dell'opera e influenzano notevolmente metodi, strumenti e risultati di conservazione. Per conseguenza, la necessità di raccogliere una documentazione completa, in grado di soddisfare sia il livello di dettaglio

dell'opera che quello di livello superiore del supporto, è un punto essenziale. In questo caso la diretta applicazione delle tecnologie digitali offre straordinari vantaggi per opere d'arte di piccole dimensioni, come ad esempio i mosaici della collezione del Museo d'Arte della città di Ravenna. Restano in campo alcune tematiche tipiche della modellazione digitale, con i relativi problemi connessi, che vanno dalla gestione di indagine multi-scalare e multi-risoluzione, alla semplificazione di modelli 3d, all'analisi del comportamento dei sensori su materiali trasparenti e riflettenti.

Le problematiche esposte sono particolarmente importanti nel caso di mosaici moderni, caratterizzati da intrinseca tridimensionalità, ma costituiti da opere di piccole dimensioni; i mosaici bizantini, invece, coprono ampie porzioni di pareti interne o soffitti, e per conseguenza, i dati di dettaglio relativi alle tessere e alle connessioni tra queste risultano meno significativi. La valutazione di questi aspetti è propedeutica all'individuazione della metodologia digitale più appropriata, e alla procedura da adottare per raccogliere informazioni in grado sia di conservazione la coerenza delle informazioni sia di gestire agevolmente grandi quantità di dati.

I problemi legati alla acquisizione mediante laser scanner di apparati musivi caratterizzati da differenti livelli di complessità geometrica e materica sono presentati da Salemi et al. (2008). In merito al confronto fra differenti metodi di rilievo applicati agli apparati musivi, invece, Brumana et al. (2007) mostrano i risultati del confronto fra rilievi eseguiti utilizzando scanner laser e tecniche fotogrammetriche per la modellazione della pavimentazione rivestita di mosaici della Basilica di San Marco a Venezia. Il caso di studio non presenta però le caratteristiche di complessità geometrica di dettaglio (disassamento delle singole tessere rispetto al piano del supporto, occlusioni nei giunti fra le tessere, ecc.) analoghe a quelle dei mosaici moderni o di quelli bizantini collocati su supporti verticali.

Il problema della semplificazione delle informazioni acquisite mediante scansione laser di apparati musivi caratterizzati da un livello di dettaglio molto complesso alla piccola scala è invece affrontato da Manferdini (2010), mentre il confronto fra metodologie di rilievo differenti applicate ad apparati musivi è riportato da Manferdini et al. 2010.

Il tema della modellazione multi-scalare a cui sono legati problemi di organizzazione delle procedure di rilievo e previsione delle diverse modalità di fruizione delle informazioni è affrontato anche da altri gruppi di ricerca, che hanno testato metodi e strumenti diversi su casi di studio che non appartengono al repertorio degli apparati musivi, ma che presentano caratteristiche geometriche analoghe unita ad una attenzione particolare al problema della gestione delle informazioni rilevate a diversi livelli di dettaglio (Remondino et al. 2009, Callieri et al. 2011).

Metodo

Nella ricerca sono state utilizzate differenti metodologie di acquisizione dei dati valutandone, per confronto sulle caratteristiche e sui risultati ottenuti, vantaggi e svantaggi. I metodi stessi sono stati anche utilizzati in differenti condizioni di indagine, quantificando precisione e accuratezza delle acquisizioni geometriche in correlazione con i tempi di acquisizione dati ed elaborazione in ciascuna procedura; le valutazioni sono state finalizzate all'individuazione della metodologia e tecnologia più idonea e conveniente a seconda del livello di dettaglio delle indagini e/o agli scopi di comunicazione. Gli obiettivi definiti sono stati molteplici, e riferibili a successivi approfondimenti di indagine: da semplici visualizzazioni del manufatto tramite web, alle ricostruzioni digitali per scopi divulgativi ma anche scientifici, per arrivare ad accurate analisi e valutazioni metriche di rilievo relative alla posizione e all'orientamento delle singole tessere destinate a studiosi e restauratori; per conseguenza sono stati individuati diversi livelli di dettaglio delle informazioni, con la relativa complessità del modello 3D ricostruito.

Nella costruzione di modelli 3D di rilievo attraverso metodi e strumenti digitali, una problematica ricorrente è la riduzione dei dati ridondanti; questa elaborazione ha la finalità di facilitare la gestione di grandi quantità di informazioni, senza perdere il necessario livello di dettaglio. La ridondanza dei dati è, di fatto, uno dei problemi principali per indagini con elevata definizione, e la riduzione di tali informazioni senza perdere singolarità e peculiarità topologiche assume particolare importanza. Nel mosaico, ad esempio, le irregolarità superficiali e i bordi taglienti costituiscono due esempi emble-

matici dei dati di dettaglio da conservare. Dal punto di vista metodologico, nella ricerca sono stati confrontati i risultati ottenuti attraverso la semplificazione di elaborazioni ad alta definizione con acquisizioni effettuate utilizzando tecnologie meno accurate e precise; una ulteriore valutazione ha riguardato l'acquisizione dell'informazione di colore.

Nel caso di studio di Sant'Apollinare Nuovo a Ravenna sono stati messi a confronto rilievi eseguiti con laser scanner e con la fotogrammetria digitale. In particolare, la prima campagna di rilievo è stata eseguita utilizzando il sistema Menci ZScan per la acquisizione fotografica e per la restituzione della mesh poligonale con texture ad alta risoluzione.

Il metodo utilizzato prevede l'acquisizione di triplette di fotogrammi acquisiti mediante camera digitale calibrata (in questo caso Nikon D80 con obiettivo 24 mm) con l'ausilio di barra per il posizionamento della camera per la ripresa delle triplette. La distanza fra le camere dipende dalla distanza dell'oggetto da rilevare dal punto di presa e dall'ottica utilizzata. Il limite massimo della distanza consiste nella lunghezza della barra che, nel nostro caso, è di 90 cm. La strumentazione è stata testata entro il limite delle sue potenzialità nel rilievo degli elementi di chiusura verticali, mentre è stato spinto oltre la lunghezza massima consigliata (12 ml circa, contro i 10 ml consigliati dalla ditta produttrice), nelle zone di contro-soffitto (Fig. 2).

Il rilievo della navata centrale di Sant'Apollinare Nuovo mediante laser scanner è stato effettuato utilizzando lo scanner Leica ScanStation C5 posizionato in tre stazioni lungo l'asse longitudinale della Basilica, mediante l'ausilio di target per la registrazione delle prese, impostando una maglia di rilievo di 2x2 cm a 8 ml di distanza dal punto di presa (Fig. 3).

Nel caso di studio preso in esame, il confronto tra i modelli ottenuti da scansione laser e da fotogrammetria hanno consentito alcune valutazioni (Fig. 4).

Da un punto di vista metrico la deviazione standard fra i due modelli è massima nella zona B (ordine di grandezza di 10 cm), mentre è minima nella zona C (ordine di grandezza di 5 mm), su piani orizzontali, paralleli al piano della pellicola fotografica, ad una distanza di circa 12 m dal punto di ripresa fotografico. L'elevato scostamento fra le due mesh nella zona B è dovuto principalmente a problemi di allineamento fra le diverse patch corrispondenti alle singole triplette di immagini da cui è stato ottenuto il modello fotogrammetrico. Nella immagine seguente è visibile il disassamento fra due patch adiacenti:

Riassumendo, fra le due metodologie adottate, quella che utilizza strumenti di laser scanning presenta un migliore allineamento fra le diverse prese, per cui non sussistono problemi di disallineamento fra patch adiacenti. Per contro, tale strumentazione non consente di ottenere automaticamente una mesh poligonale dalle nuvole di punti acquisite, ma fornisce informazioni che devono essere rielaborate manualmente (in pratica occorre costruire il modello 3d a partire dalle nuvole di punti), riducendo drasticamente la definizione del modello. Nel caso in esame, per ovviare a questo inconveniente e quindi confrontare modelli con livelli di definizione paragonabili, la mesh poligonale è stata costruita a partire dalla nuvola di punti utilizzando il software MeshLab, che, per contro, non consente all'operatore un completo controllo dei parametri di meshing.

Tale strumentazione non consente inoltre di ottenere una texture di alta qualità utilizzando i valori RGB acquisiti da laser scanner. La qualità del dato radiometrico può essere incrementata ri-mappando la nuvola di punti o la mesh poligonale utilizzando fotografie acquisite utilizzando una camera ad alta risoluzione.

Il metodo fotogrammetrico adottato ha restituito un modello con un accuratezza inferiore dovuta principalmente a problemi di allineamento fra patch adiacenti. Per contro, tale metodologia consente di ottenere automaticamente sia il dato radiometrico ad alta qualità che la superficie poligonale, riducendo sensibilmente il tempo di elaborazione dei dati acquisiti.

Conclusioni

Il contributo vuole individuare metodologie di indagine basate sulle tecnologie digitali, con i relativi strumenti, utilizzabili da musei e istituzioni chiamate a preservare e promuovere il loro patrimonio storico e artistico. In particolare, nel caso di studio dei mosaici, la costruzione delle loro repliche

digitali costituisce un ausilio di notevole importanza ed utilità sia per la pianificazione degli interventi di restauro, sia per la costruzione di collezioni digitali, fornendo al contempo informazioni più complete e flessibili.

Problemi di ricerca aperti, e comuni a tutti i gruppi che stanno indagando sul tema, sono i livelli di dettaglio del manufatto, la multi-scalarità del modello, le caratteristiche radiometriche del materiale e la gestione e organizzazione di enormi quantità di dati.

I metodi image-based sono apparsi ottimali per le visualizzazioni, quando la precisione metrica e le valutazioni di dettagli di ridotte dimensioni diventano meno importanti rispetto alla ricostruzione della geometria e delle caratteristiche radiometriche del manufatto complessivo. In questi casi, infatti, questa metodologia consente di velocizzare e facilitare sia l'acquisizione dei dati che la post-elaborazione delle procedure, fornendo direttamente e automaticamente informazioni metriche attraverso immagini ad alta risoluzione.

Nella progettazione di indagini più dettagliate e accurate, per la necessità di gestire enormi quantità di dati raccolti mediante scanner laser a triangolazione, appaiono necessarie valutazioni preliminari sia sulla risoluzione da adottare durante la campagna di rilievo, sia sui metodi di semplificazione dei dati nel post-processing. Il confronto tra diversi approcci attraverso l'utilizzo di differenti risoluzioni in diverse condizioni di indagine, hanno permesso l'individuazione di maglie ottimali di indagine, facilitando sia l'acquisizione sistematica di ampie mole di dati che le procedure di elaborazione degli stessi.

Un ulteriore caso particolare di definizione delle prestazioni della procedura di rilievo si ha quando viene richiesto dai restauratori un livello di dettaglio delle informazioni corrispondente alla riproduzione di una replica fisica del manufatto con procedure digitali, in grado di sostituire i calchi in gesso. Per conseguenza la qualità del modello 3d deve essere progettata in funzione delle caratteristiche delle tecnologie di prototipazione rapida (cioè 3d stampa o macchine a controllo numerico).

Dal punto di vista operativo, infine, ulteriori miglioramenti possono essere ottenuti utilizzando strumenti in grado di velocizzare e automatizzare le procedure di indagine, in condizioni di indagine differenti. Apparecchiature che consentano agli strumenti digitali di avvicinarsi a manufatti inaccessibili da terra, e che contemporaneamente consentano movimenti precisi che non influiscono sulle misure metriche, sarebbero estremamente utili ad esempio in caso di indagini di mosaici bizantini, di solito posizionati su soffitti e pareti di architetture.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Linda Kniffitz, curatrice del Centro Internazionale di Documentazione sul Mosaico CIDM per la sua preziosa collaborazione e per aver messo a disposizione il cartone musivo di Libera Musiani riportato in Figura 1. Gli autori desiderano inoltre ringraziare il Dott. Franco Faranda del Ministero per i Beni e le Attività Culturali per aver agevolato le operazioni di accesso alla Basilica di Sant'Apollinare Nuovo a Ravenna.

Bibliografia

Bernardini F., Rushmeier H. (2002). *The 3D Model Acquisition Pipeline*. *Computer Graphics Forum*, 21(2), pp. 149-172.

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

Brumana R., Fregonese L., Monti C., Monti C.C., Monti G., Vio E. (2007). *Complex analyses of surface, modelling and comparison of the 3D orthophoto to the real scale with historical cartography: mosaic surface of basilica of San Marco in Venice*. *e-Perimtron*, 2 (4), pp. 224-244.

Callieri M., Chica A., Dellepiane M., Besora I., Corsini M., Moyés J., Ranzuglia G., Scopigno R., Brunet P. (2011). *Multiscale acquisition and presentation of very large artifacts: The case of Portalada*. *ACM J. Comput. Cult. Herit.*, 3 (4), pp. 1-20.

Manferdini A.M. (2010). *Digital survey of ancient mosaics of Ravenna*. *Proc. ISPRS Commission V Mid-Term Symposium 'Close Range Image Measurement Techniques'*, pp. 434-439.

Manferdini A.M., Cipriani L., Kniffitz L. (2011). *Methodologies for Digital 3D Acquisition and Representation of Mosaics. Proceeding of the SPIE Optical Metrology 20th International Congress on Photonics in Europe, 8085*, pp. 1-12.

Pavlidis, G., Koutsoudis, A., Arnaoutoglou F., Tsioukas V., Chamzas C. (2007). *Methods for 3D digitization of Cultural Heritage, Journal of Cultural Heritage, 8*, pp. 93-98.

Remondino F. (2011). *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing, 3(6)*, pp. 1104-1138.

Remondino F., Girardi S., Rizzi A., Gonzo L. (2009). *3D Modeling of Complex and Detailed Cultural Heritage Using Multi-Resolution Data. ACM J. Comput. Cult. Herit., 2 (1)*, pp. 1-20.

Salemi G., Achilli V., Ferrarese M., Boatto G. (2008). *High resolution morphometric reconstruction. Proc. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII, B5*, pp. 303-307.

Scopigno R., Callieri M., Cignoni P., Corsini M., Dellepiane M., Ponchio F., Ranzuglia G. (2011). *3D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization. Computer, 44 (7)*, pp. 48-55.

Stanco F., Battiato S., Gallo G. (eds.) (2011). *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation. Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks. CRC Press/Taylor & Francis.*

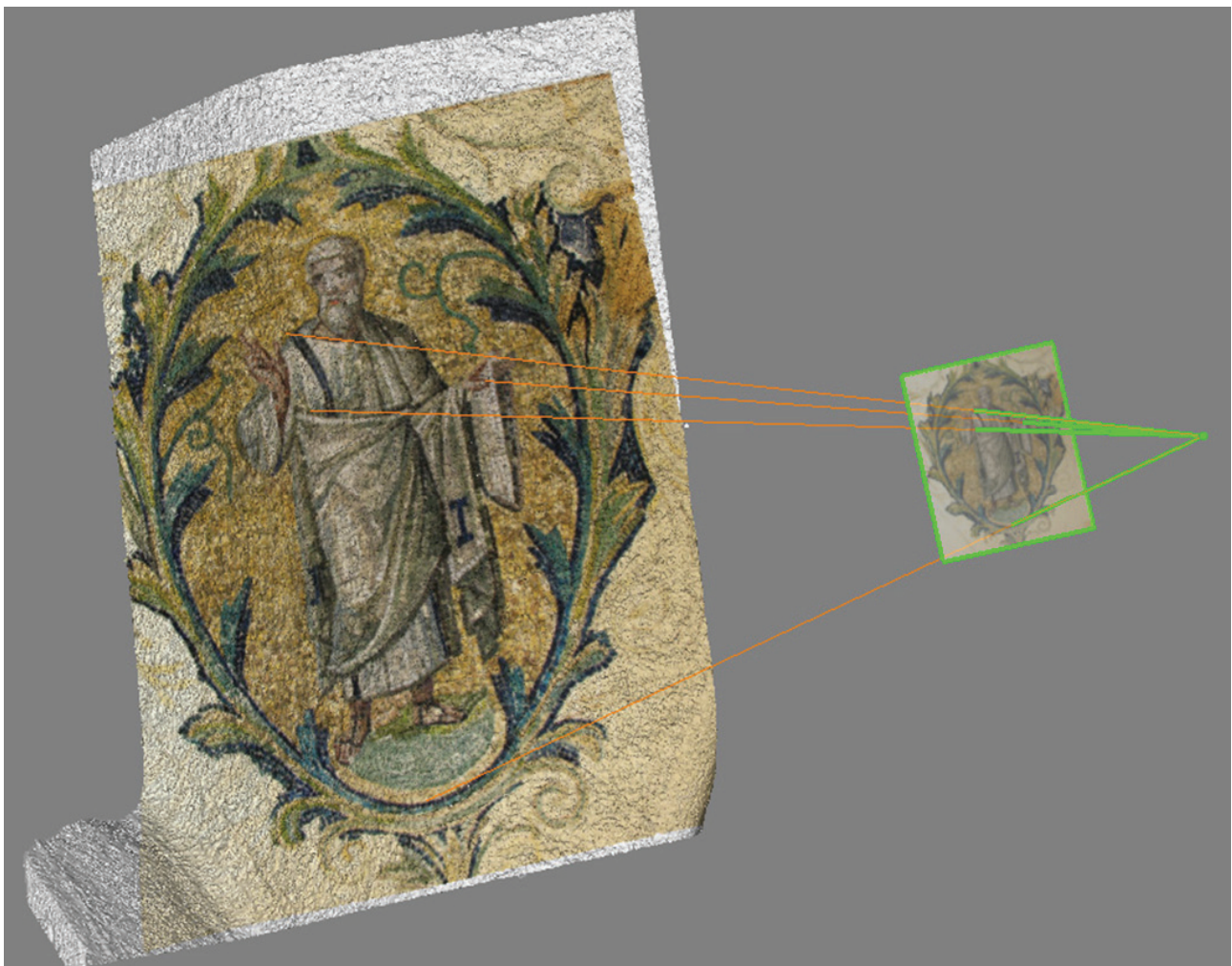


Figura 1. Proiezione dell'immagine del cartone musivo di Libera Musiani (tempera su carta da lucido, 1937) sulla superficie tridimensionale ottenuta da scansione di apparato musivo di Profeta nel Battistero Neoniano a Ravenna.



Figura 2. Modello di Sant'Apollinare Nuovo ottenuto da fotogrammetria (Menci ZScan).



Figura 3. Modello di Sant'Apollinare Nuovo ottenuto da scansione laser (Leica ScanStation C5).

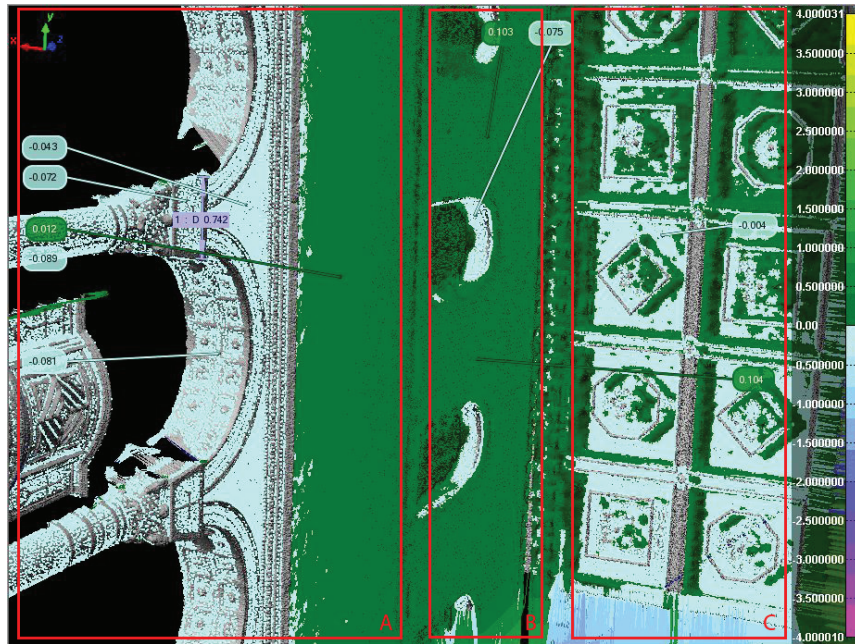


Figura 4. Confronto fra porzione di modello ottenuto da scansione laser (Leica ScanStation C5, maglia di 2x2 cm a 8 ml di distanza dal punto di presa) e ottenuto mediante fotogrammetria (Menci ZScan, camera Nikon D80, obiettivo 24 mm, distanza i punti di ripresa fotografica: 90 cm).

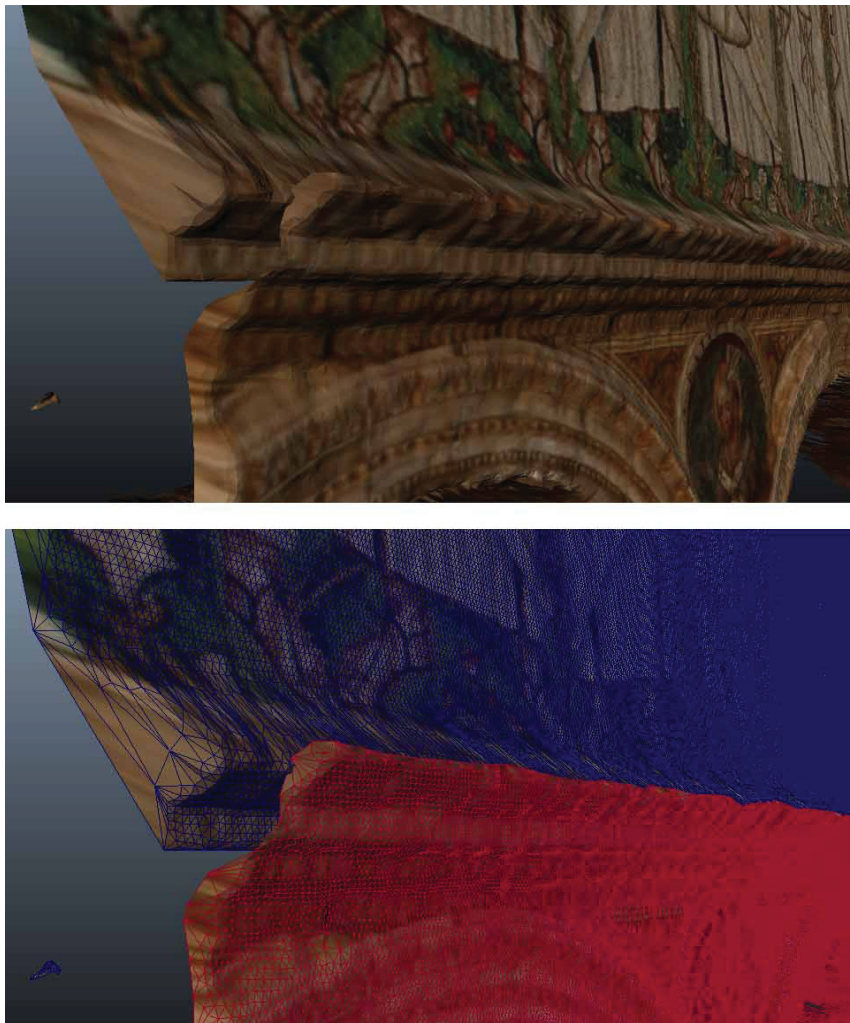


Figura 5. Dettaglio di zona di transizione fra due patch successive ottenute da fotogrammetria digitale.