



Tecniche integrate di rilievo fotogrammetrico e TLS per la documentazione di architetture dipinte

Andrea Zerbi
Sandra Mikolajewska

Abstract

Oggi la digitalizzazione svolge un ruolo fondamentale nella tutela, conservazione e valorizzazione dei beni culturali. Relativamente all'architettura monumentale storica tale operazione passa necessariamente attraverso la realizzazione di accurati rilievi tridimensionali. Nonostante sia ormai opinione comune che un rilievo basato sull'utilizzo congiunto di tecniche *image-based* e tecniche *range-based* sia fondamentale, oggi tale integrazione non può ancora considerarsi completa dal momento che, nella maggior parte dei casi, i dati raccolti utilizzando le due tecniche vengono perlopiù processati separatamente e poi uniti in un unico sistema di riferimento utilizzando coordinate note. Il presente contributo illustra un metodo di lavoro in cui dati di rilievo laser scanner e dati desunti da rilievi fotogrammetrici sono utilizzati simultaneamente al fine di realizzare un unico modello digitale 3D in cui la geometria sia ricavata dai dati laser scanner, mentre la resa cromatica delle superfici sia desunta dalle immagini fotografiche. Le procedure descritte si rivelano particolarmente efficaci soprattutto nel caso di architetture caratterizzate dalla presenza di importanti apparati decorativi pittorici. Per questo motivo le prime sperimentazioni hanno riguardato il rilievo della Camera di San Paolo a Parma, nota soprattutto per la *camera della badessa*, affrescata da Correggio nel 1519.

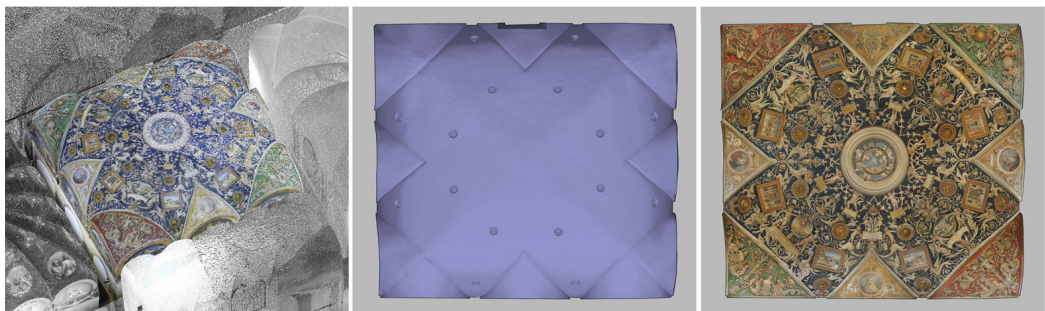
Parole chiave

Rilievo integrato, laser scanning, fotogrammetria, Camera di San Paolo, restauro degli affreschi

Topics

Comprendere / condividere / elaborare / indagare / mappare / osservare / sperimentare / visualizzare

Modelli digitali della volta con le decorazioni attribuite a Alessandro Araldi presso la Camera di San Paolo a Parma. Sintesi del flusso di lavoro qui proposto (da sinistra verso destra: nuvola di punti laser scanner; modello mesh, ortofoto della volta).



Introduzione

Soprattutto a partire dall'inizio del XXI secolo, grazie anche ai sempre più veloci e costanti sviluppi delle tecnologie informatiche, la digitalizzazione del patrimonio culturale ha assunto sempre maggiore importanza, tanto da essere inserita all'interno di numerosi piani promossi dall'Unione Europea e da entrare a fare parte delle agende politiche di diverse nazioni [European Commission 2018; Community Research and Development Information Service, 2021]. È interessante notare come la digitalizzazione, in qualsiasi sua forma, non solo sia reputata essenziale per la tutela, la conservazione, la comunicazione e la valorizzazione del patrimonio culturale, ma come i suoi prodotti siano entrati essi stessi a fare parte del patrimonio culturale.

Nello specifico ambito dell'architettura monumentale storica, la digitalizzazione deve necessariamente passare attraverso la realizzazione di accurati rilievi tridimensionali tramite i quali generare modelli 3D di supporto alle più diverse attività: dal restauro alla divulgazione, dalla gestione alla valorizzazione e via dicendo. A tale proposito è ormai opinione comune che un'operazione di rilievo corretta debba, nella maggior parte dei casi, basarsi sull'integrazione di diverse tecniche di rilievo utilizzate in modo congiunto. Questo appare particolarmente evidente nel momento in cui sia necessario realizzare modelli digitali relativi a edifici caratterizzati dalla presenza di apparati decorativi plastici e pittorici particolarmente importanti, per i quali risulti indispensabile fornire informazioni dettagliate sia relativamente alla geometria e alla consistenza dimensionale delle diverse parti, sia relativamente agli aspetti cromatici. In questi casi, un rilievo basato sull'utilizzo congiunto di tecniche *image-based* e tecniche *range-based* risulta fondamentale.

Nonostante gli sviluppi tecnologici a supporto di entrambe le tecniche abbiano cercato di rendere fotogrammetria e tecnologia laser scanner il più possibile indipendenti ed autonome, il loro utilizzo integrato consente oggi di ottenere i risultati più soddisfacenti [Remondino 2011; Luhmann et al. 2020; Fiorillo et al. 2021]. D'altro canto, non è possibile non sottolineare come tale integrazione non possa ancora considerarsi completa. Nella maggior parte delle esperienze condotte anche in tempi recenti, infatti, i dati raccolti utilizzando le due tecniche vengono perlopiù processati separatamente e poi uniti in un unico sistema di riferimento utilizzando coordinate note ricavate dal rilievo laser scanner oppure da rilievi topografici di supporto [Valente et al. 2019].

Il presente contributo illustra un metodo di lavoro in cui dati di rilievo laser scanner e dati desunti da rilievi fotogrammetrici sono utilizzati simultaneamente già dalle prime fasi di processamento, sfruttando gli ultimi sviluppi del software Agisoft Metashape, che permette di importare dati laser scanner convertiti in immagini sferiche e di elaborarli simultaneamente con immagini *frame*. L'obiettivo è quello di operare direttamente su un unico modello digitale 3D in cui la geometria sia ricavata dai dati laser scanner, mentre la resa cromatica delle superfici sia desunta dalle immagini fotografiche.

Il caso studio: la Camera di San Paolo a Parma

Il metodo illustrato nel presente contributo prende le mosse da un rilievo realizzato per fornire il supporto indispensabile al restauro di tutte le superfici verticali e voltate del complesso museale noto come "Camera di San Paolo" a Parma (fig. 01). La "Camera di San Paolo" è oggi un itinerario museale collocato all'interno dell'antico monastero benedettino femminile di San Paolo ed è costituito da nove ambienti. Ad esclusione di quello che una volta fungeva da refettorio del monastero, tutte le altre stanze facevano parte dell'appartamento privato della badessa Giovanna da Piacenza. Solo la zona di accesso al percorso è stata modificata nel corso del XIX secolo per volere di Maria Luigia. Ciò che rende straordinario l'itinerario museale è la presenza di un gioiello dell'arte rinascimentale italiana, ossia la cosiddetta *camera della badessa*, affrescata nel 1519 da Antonio Allegri, detto il Correggio [Fadda 2018]. L'ambiente, a pianta quasi quadrata, è coperto da una volta a ombrello a 16 spicchi interamente decorata con un finto pergolato costituito da canne di bambù, rami intrecciati e

Fig. 01. Pianta del piano terra del percorso museale (realizzata a quota +1.70 m). Scala originale dell'elaborato 1:50. Elaborazione grafica degli autori.

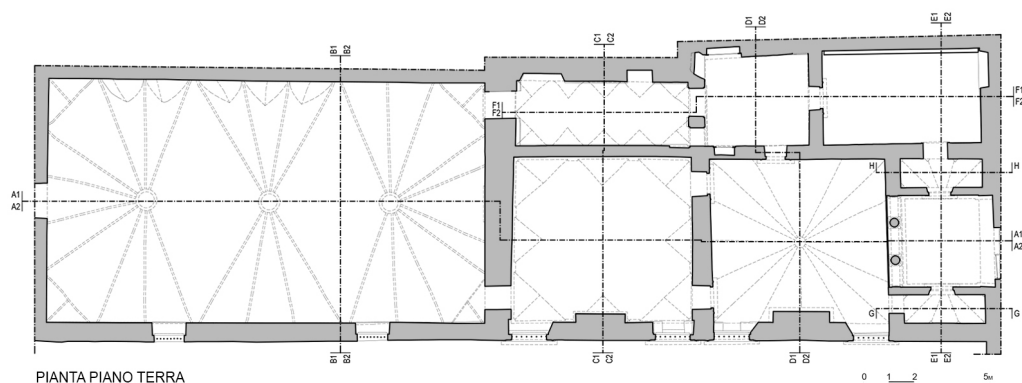


Fig. 02. Particolari degli affreschi realizzati dal Correggio (fotografia di sinistra) e quelli attribuiti a Araldi (fotografia di destra). Fotografie degli autori.

festoni di fiori e frutti in cui trovano posto 16 finte aperture ovali da cui si affacciano gruppi di putti. Al di sotto, lungo le pareti verticali, si trovano altrettante lunette monocrome che simulano nicchie contenenti statue di figure mitologiche e un fregio caratterizzato dalla presenza di finte capitelli costituiti ciascuno da due teste di ariete contrapposte che reggono teli, piatti, vasi, stoviglie e altri oggetti (fig. 02). Sulla cappa del camino trova invece posto la figura della dea Diana su un cocchio, evidente richiamo alla badessa Giovanna, committente dell'opera.

Adiacente alla *camera della badessa* si trova un altro ambiente di grande valore artistico, probabilmente affrescato da Alessandro Araldi nel 1514. Qui, la volta a padiglione lunettata presenta una straordinaria decorazione a grottesca al cui centro si inserisce una finta balaustra aperta sul cielo azzurro, dalla quale si affacciano putti musicanti.

Dal 21 aprile del 2021, il Comune di Parma, proprietario del bene, ha incaricato una ditta specializzata di procedere al restauro dell'intero percorso museale e della Cella di Santa Caterina. A tal fine è parsa fondamentale la realizzazione di un'accurata campagna di rilievi, reputati essenziali sia per conoscere l'esatta conformazione dei luoghi, sia per poter sviluppare il progetto di restauro su elaborati attendibili. A tale proposito le richieste riguardavano la possibilità di avere a disposizione piante e sezioni dell'intero itinerario museale in scala 1:50, nonché le ortofoto in scala 1:50 di tutte le pareti verticali e di tutte le coperture voltate.

Il rilievo integrato

Al fine di poter rispondere alle specifiche richieste della committenza, si è deciso di procedere alla realizzazione di un rilievo integrato (svolto nel mese di giugno del 2021) basato sull'utilizzo di tecniche fotogrammetriche e laser scanner. Mentre quest'ultimo risulta infatti particolarmente efficace per il rilievo di spazi interni caratterizzati da una distribuzione piuttosto articolata, il rilievo fotogrammetrico garantisce una maggiore accuratezza per ciò che concerne la restituzione dei dati cromatici e radiometrici. Per la realizzazione del rilievo laser scanner è stato utilizzato uno scanner laser Leica RTC360 dotato di una camera HDR da 36 Mpixel. Complessivamente sono state realizzate 41 scansioni a partire dal chiostro confinante con il percorso museale. Per ogni ambiente interno sono stati individuati due o tre punti di stazione a seconda della complessità e della ricchezza dell'apparato decorativo, prestando particolare attenzione alla massima riduzione delle zone d'ombra. Date le dimensioni piuttosto ridotte delle stanze e il numero di scansioni effettuate in ognuna di esse, si è stabilito che una risoluzione pari a 6 mm a 10 m di distanza fosse in grado di garantire risultati adeguati. Ulteriori stazioni sono state collocate nelle zone di passaggio fra un ambiente e l'altro in modo tale da garantire un'adeguata registrazione delle nuvole di punti. Sfruttando la camera integrata nel laser scanner, per ogni scansione sono state acquisite 36 immagini con risoluzione pari a 4000x3000 pixel, che lo strumento restituisce sotto forma di immagini sferiche. Al termine delle operazioni di campagna, attraverso il software dedicato Leica Cyclone, i dati sono stati registrati in un unico sistema di riferimento al fine di ottenere un'unica nuvola di punti dell'intero complesso (fig. 03). Contestualmente sono state esportate le immagini equirettangolari acquisite dallo strumento (fig. 04).

Parallelamente al rilievo laser scanner è stato realizzato un rilievo fotogrammetrico utilizzando una fotocamera *full-frame* Nikon D3X DSLR in grado di scattare immagini con risoluzione pari a 6048x4032 pixel, equipaggiata con obiettivi da 35 mm o 24 mm a seconda della dimensione degli ambienti da rilevare. Al fine di garantire la maggiore uniformità possibile dal punto di vista radiometrico, tutte le immagini sono state scattate in condizioni di luce artificiale usando una carta di calibrazione del colore, avendo cura di posizionare la camera su un treppiede ed utilizzando un telecomando di scatto remoto. Per ogni singola parete verticale di ogni singolo ambiente costituente il percorso espositivo sono state effettuate tre strisciate, unite da ulteriori scatti obliqui in corrispondenza degli angoli.

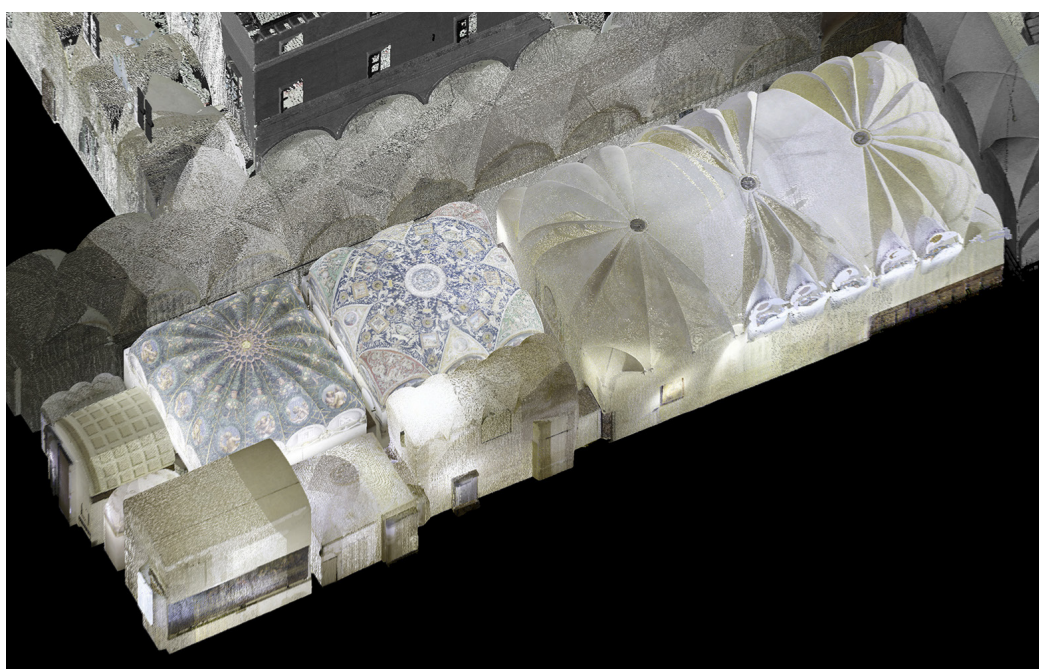


Fig. 03. Nuvola di punti dell'intero percorso museale proveniente dal rilievo laser scanner. Elaborazione grafica degli autori.

Per tutte le volte sono invece state realizzate due strisciate a diverse altezze, anche in questo caso con l'aggiunta di ulteriori immagini oblique. A titolo esemplificativo, in ognuna delle due stanze più preziose del complesso (quella attribuita a Araldi e quella affrescata dal Correggio) sono stati effettuati circa 170 scatti.

Il metodo di lavoro e l'elaborazione dei dati

La nuvola di punti ricavata dal rilievo laser scanner, già registrata, è stata inizialmente scomposta in diverse parti in modo tale da poter operare separatamente su ogni stanza con file di dimensioni più ridotte. Ogni partizione è stata quindi esportata in formato .E57 e importata all'interno del software Metashape. Le ultime versioni del programma sono in grado di eseguire un pre-processamento in cui ogni singola scansione viene convertita in una immagine equirettangolare (formato .tif), in cui a ogni pixel corrisponde un punto della scansione. Una volta importate, quindi, le nuvole di punti sono state trasformate in panorami sferici RGB con relative mappe di profondità e parametri di orientamento esterno (posizione dei centri di presa e rotazioni) noti e derivati direttamente dal rilievo laser scanner (fig. 05).

Dopo aver svolto questa operazione, che ha permesso di avere, all'interno dell'ambiente di lavoro fotogrammetrico, i dati derivanti dal rilievo laser scanner, si è proceduto al caricamento delle immagini frame che, naturalmente, risultano prive di parametri di orientamento noto. Tali immagini sono quindi state sottoposte ad un normale processo di orientamento congiuntamente alle immagini equirettangolari relative ad ogni singola scansione. In questa fase l'orientamento delle immagini sferiche è stato mantenuto fisso al fine di vincolare l'orientamento di tutto il blocco e poter generare un unico blocco fotogrammetrico in cui il sistema di riferimento e la scala sono determinati direttamente dai parametri di orientamento esterno derivanti dal rilievo laser scanner. Il vantaggio di agire in questo modo è rappresentato dal fatto che è possibile operare senza la necessità di individuare preventivamente punti d'appoggio o co-registrare a posteriori i dati ottenuti dal rilievo TLS e quelli prodotti dalla fotogrammetria. A questo punto, in un normale processo fotogrammetrico basato sull'utilizzo di *Metashape*, seguirebbe un processo di dense matching tra tutte le immagini componenti il blocco, al fine di ottenere una nuvola di punti che ricostruisca l'oggetto rilevato e che sia il supporto su cui basare la costruzione del modello *mesh*.

Così facendo, però, si andrebbero ad annullare tutte le informazioni di profondità derivanti dai dati desunti dal rilievo laser scanner, andando potenzialmente a variare la precisione del dato geometrico.

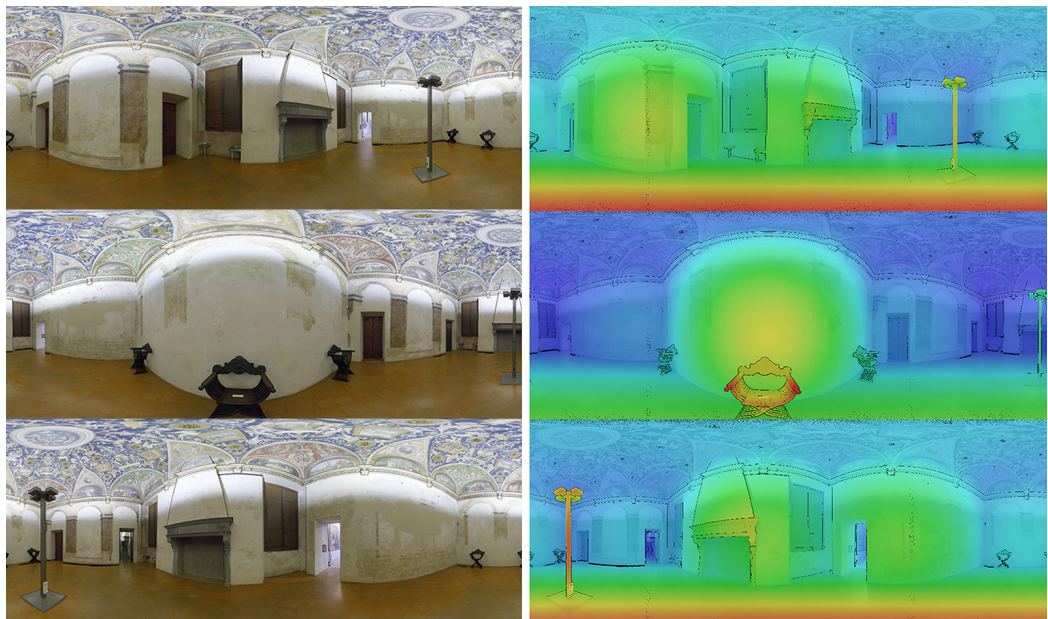


Fig. 04, 05 - Immagini equirettangolari e relative mappe di profondità derivanti dalle scansioni laser effettuate nella stanza affrescata da Araldi. Elaborazione degli autori.

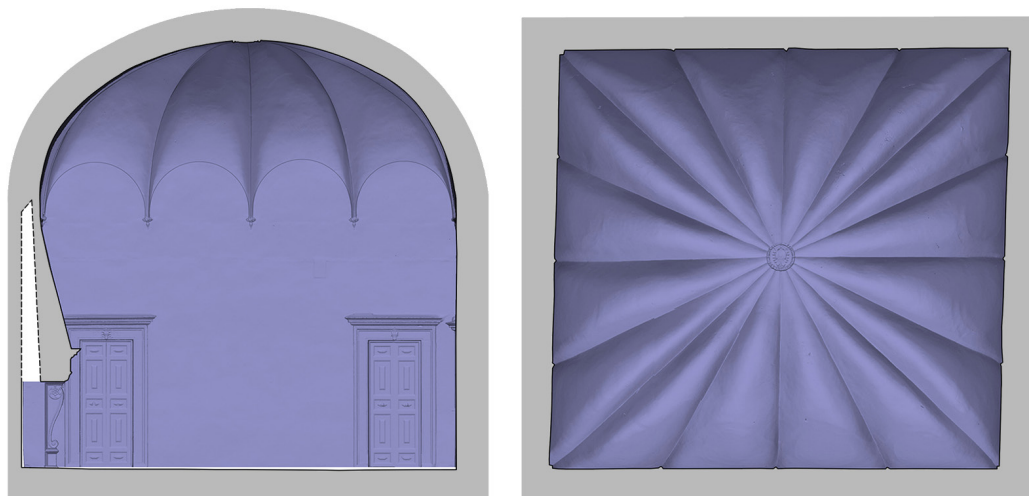


Fig. 06. Particolari del modello *mesh* della camera della badessa (a sinistra: parete est, a destra: volta). Elaborazione grafica degli autori.



Fig. 07. Confronto fra le ortofoto calcolate utilizzando le informazioni radiometriche provenienti dal laser scanner (a sinistra delle immagini) e quelle dal rilievo fotogrammetrico (a destra delle immagini). Elaborazione grafica degli autori.

Nel flusso di lavoro qui proposto si è quindi evitato di procedere in modo canonico attraverso la generazione di una nuvola di punti densa e si è invece proceduto andando a ricostruire il modello *mesh* utilizzando direttamente le mappe di profondità dei panorami. In questo modo è stato possibile generare una *mesh* in cui il dato geometrico è derivato interamente ed esclusivamente dai dati rilevati tramite laser scanner (fig. 06). Una volta ultimato il modello *mesh* è stato possibile procedere alla produzione delle ortofoto. Come già specificato, le immagini *frame* sono orientate coerentemente con le immagini equirettangolari. Grazie a questo, per la generazione delle ortofoto è stato possibile utilizzare solo ed esclusivamente le immagini *frame*, che consentono di restituire un dato radiometrico di qualità molto superiore rispetto a quello ottenibile utilizzando la fotocamera integrata del laser scanner (fig. 07). Al termine delle operazioni di restituzione sono state elaborate 42 ortofoto (una per ogni parete verticale, una per ogni soffitto e una per il pavimento della camera della badessa) con una risoluzione di 1 mm/pix. Tale risoluzione risulta molto superiore rispetto a quanto necessario per elaborati da riprodurre in scala 1:50, come richiesto dalla committenza. A tale proposito, le ortofoto sono state poi inserite all'interno dei tradizionali elaborati di rilievo rappresentati, in questo caso, da due piante (una a quota +1.70 m rispetto al pavimento della camera della badessa, rivolta verso il basso, e una a quota variabile, rivolta verso l'alto) e quattordici sezioni verticali (figg. 08, 09).

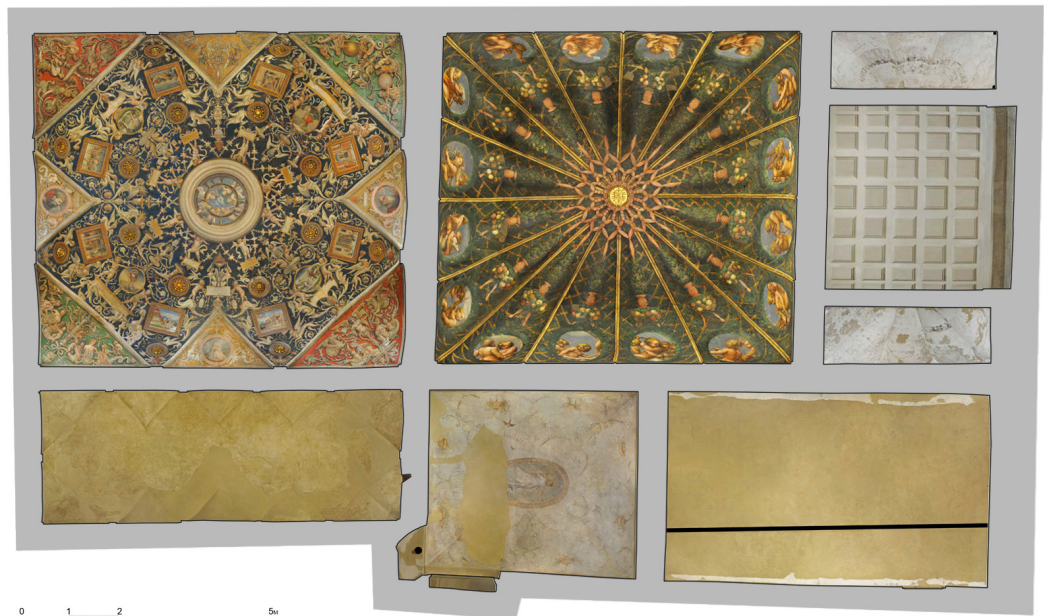


Fig. 08. Stralcio della pianta dei soffitti (rivolta verso l'alto). Scala originale dell'elaborato 1:50. Elaborazione grafica degli autori.



Fig. 09. Stralcio della sezione A2-A2. Scala originale dell'elaborato 1:50. Elaborazione grafica degli autori.

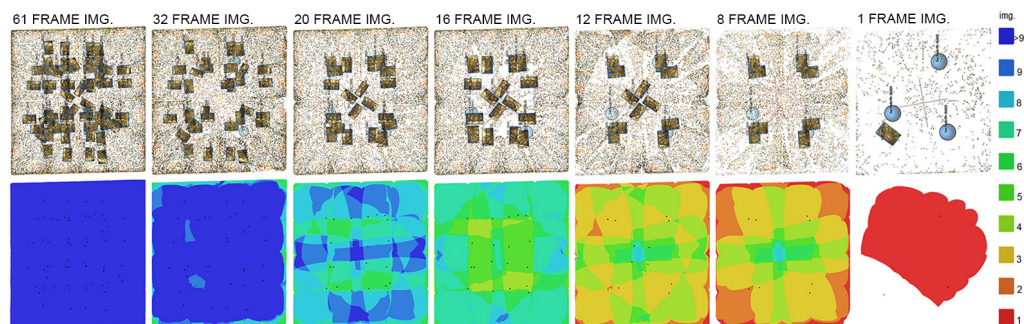


Fig. 10. Validazione dei risultati al diminuire del numero di immagini frame utilizzate. L'immagine riassume le geometrie di blocco testate e la relativa sovrapposizione delle immagini. Elaborazione grafica degli autori.

Conclusioni

Il metodo di lavoro qui illustrato presenta alcuni indiscutibili vantaggi. Innanzitutto, permette di ottenere ortofoto caratterizzate da un livello di precisione del dato geometrico elevato poiché frutto del dato TLS e, contemporaneamente, dall'attendibilità del dato radiometrico ricavato invece dalle immagini *frame*. Inoltre, permette di orientare correttamente le immagini *frame* senza la necessità di posizionare preventivamente punti di appoggio; tale possibilità si dimostra particolarmente utile in tutti quei casi in cui, per i più diversi motivi, sia impossibile collocare preventivamente *target*, consentendo altresì di velocizzare le operazioni di campagna. Per finire, un ulteriore vantaggio offerto dal metodo qui proposto è quello di poter ridurre il numero di immagini (fig. 10) che sarebbero normalmente richieste dal software per poter orientare le immagini e, soprattutto, per ottenere un modello *mesh* accurato. Quest'ultimo, infatti, viene direttamente ricavato dai dati TLS.

Nonostante la sua apparente semplicità, le modalità operative illustrate, al momento, non hanno ancora trovato numerose applicazioni. Il rilievo qui presentato è stato quindi anche una occasione per testare e validare la metodologia proposta [Bruno et al. 2022]. Limitatamente alla *camera della badessa* e a quella i cui affreschi sono attribuiti ad Araldi sono stati fatti test aggiuntivi, rispetto alle elaborazioni necessarie alla produzione degli elaborati richiesti dalla committenza. Tali test hanno permesso di verificare l'accuratezza dei risultati in confronto ad un approccio di co-registrazione tradizionale basato sull'uso di punti di appoggio e di testare la robustezza del metodo anche in condizioni operative differenti, ad esempio riducendo notevolmente il numero di immagini *frame* utilizzate. Tutte le sperimentazioni finora condotte hanno portato ad esiti soddisfacenti, in grado di dimostrare che la precisione delle ortofoto generate sia quanto meno pari a quella che è possibile ottenere utilizzando procedure ormai consolidate.

Riferimenti bibliografici

Bruno, N. et al. (2022). Integrated processing of photogrammetric and laser scanning data for frescoes restoration. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XLVI-2/W1-2022. Atti del 9th Intl. Workshop 3D-ARCH 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. Mantova, 2-4 marzo 2022, pp. 105-112.

Community Research and Development Information Service (2021). *Results Pack on digital cultural heritage. How digital technologies can play a vital role for the preservation of Europe's cultural heritage.* <<https://cordis.europa.eu/article/id/413473-how-digital-technologies-can-play-a-vital-role-for-the-preservation-of-cultural-heritage>>. (consultato il 6 novembre 2021).

European Commission (2018). *Cultural Heritage: Digitization, online accessibility and digital preservation. Consolidated Progress Report on the implementation of Commission Recommendation (2011/711/EU) 2015-2017.* <<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-commission-report-cultural-heritage-digitisation-online-accessibility-and-digital>> (consultato il 6 novembre 2021).

Fadda, E. (2018). *Come in un rebus. Correggio e la Camera di San Paolo.* Firenze: Leo S. Olschki Editore.

Fiorillo, F. et al. (2021). Integrazione dei dati acquisiti con sistemi image-based e range-based per una rappresentazione 3D efficiente. In Arena A. et al. (a cura di). *Connettere. Un disegno per annodare e tessere.* Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Reggio Calabria, 16-18 settembre 2021, pp. 2319-2337. Milano: FrancoAngeli.

Luhmann, T. et al. (2020). Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia. In *Drones*, n. 4, 53.

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

Terrestrial laser scanning data processing. (8 febbraio 2021). <<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000159101-terrestrial-laser-scanning-data-processing>> (consultato il 6 novembre 2021).

Valente, R. et al. (2019). Documentation of historical architectures through the combined use of digital surveying techniques. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XLII-2/W11. Atti del 2nd International Conference of Geomatics and Restoration GEORES 2019, Milano, 8-10 maggio 2019, pp. 1121-1125.

Autori

Andrea Zerbi, Università di Parma, andrea.zerbi@unipr.it

Sandra Mikolajewska, Università di Parma, sandra.mikolajewska@unipr.it

Per citare questo capitolo: Zerbi Andrea, Mikolajewska Sandra (2022). Tecniche integrate di rilievo fotogrammetrico e TLS per la documentazione di architetture dipinte/ Integrated techniques of photogrammetric survey and TLS for the documentation of frescoed architectures. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare.* Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 2980-2995.



Integrated techniques of photogrammetric survey and TLS for the documentation of frescoed architectures

Andrea Zerbi
Sandra Mikolajewska

Abstract

Today, digitization plays a fundamental role in the preservation, conservation and valorization of cultural heritage. In the specific field of monumental architecture, this operation necessarily passes through accurate three-dimensional survey campaigns. Although it is now a common opinion that a survey based on the integration of image-based and range-based techniques is fundamental, it is necessary to note that this integration cannot be yet considered fully complete. In most cases, the data collected using the two techniques are processed separately and then merged into a single reference system using coordinates obtained from the laser scanner or topographic survey.

This paper illustrates a workflow in which laser scanner and photogrammetric data are used simultaneously from the beginning of the data processing phase. The aim is to obtain a unique 3D model in which the geometry is derived from TLS data and the radiometry from photogrammetric images. This approach is particularly successful especially in the case of architectures with a rich pictorial decorative apparatus. The first experiments of the proposed methodology regarded the survey campaign carried out on the Camera di San Paolo in Parma, well-known thanks to the so-called *chamber of the Abbess*, frescoed in 1519 by Correggio.

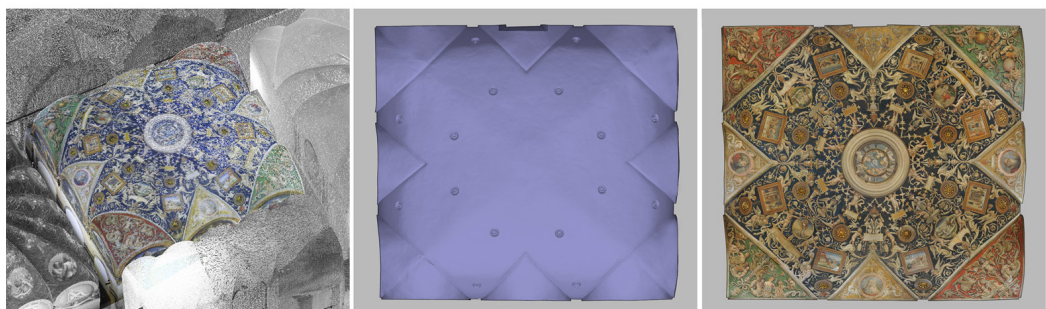
Keywords

Integrated survey, laser scanning, photogrammetry, Camera di San Paolo, frescos restoration

Topics

Understanding / sharing / elaborating / investigating / mapping / observing / experimenting / visualizing

Digital models of the vault with decorations attributed to Alessandro Araldi at the Camera di San Paolo in Parma. Summary of the workflow proposed in this paper (from left to right: laser scanner point cloud, mesh model, orthophoto of the vault).



Introduction

Since the beginning of the 21st century, thanks also to the constant development of information technology, the digitization of cultural heritage has become increasingly important. Today, this operation is promoted by the numerous European programs and takes part of the political agendas of various nations [European Commission 2018; Community Research and Development Information Service, 2021]. The digitization process is not only considered essential for the preservation, communication and valorization of cultural heritage, but its outputs are starting to become part of the cultural heritage itself.

In the specific field of monumental architecture, digitization must necessarily pass through accurate three-dimensional survey campaigns. Starting from these, it is possible to create 3D models which can be useful to support many activities: restoration, dissemination, management, enhancement and so on. In the last few years there have been many debates aimed at demonstrating the greater reliability of one technique rather than another. Today, the common opinion is that an accurate survey operation must be based, in most cases, on the integration of different survey techniques. When dealing with historical buildings with rich plastic and pictorial decorative apparatus, it is important to provide detailed information from both dimensional and chromatic point of view. In these cases, a survey based on the image and range-based techniques is essential.

Despite the many technological developments have made photogrammetry and laser scanner technique almost independent from each other, the most satisfying results can be obtained by their integrated use [Remondino 2011; Luhmann et al. 2020; Fiorillo et al. 2021]. However, it is necessary to note that this integration cannot be yet considered fully complete. In most cases, the data collected using the two techniques are processed separately and then merged into a single reference system using coordinates obtained from the laser scanner or topographic survey [Valente et al. 2019].

This paper illustrates a workflow in which laser scanner and photogrammetric data are used simultaneously from the beginning of the data processing phase. This is possible thanks to the latest developments of the Agisoft Metashape software that allows to import laser scanner data (converted to spherical images) and to process them directly with the frame images. The aim is to obtain a unique 3D model in which the geometry is derived from TLS data and the radiometry from photogrammetric images.

The case study: the “Camera of San Paolo” in Parma

The methodology illustrated in this paper was tested during a survey campaign conducted on the museum itinerary known as “Camera di San Paolo” in Parma (Italy), where for the restoration project accurate documentation was required (fig. 01). This itinerary is located inside the ancient Benedictine female monastery of St. Paolo in Parma and includes nine rooms. Excluding the one that once served as the monastery refectory, all the other rooms were part of the private apartment of the abbess Giovanna from Piacenza. The few transformations carried out within this part of the complex concern the access area, which was modified during the 19th century by Maria Luigia. What makes the museum itinerary extraordinary is the presence of Italian Renaissance masterpiece, the so-called *Chamber of the Abbess*, frescoed in 1519 by Antonio Allegri, known as Correggio [Fadda 2018].

The room has an almost square plan and is covered by an umbrella vault decorated with an illusionistic pergola, made of bamboo canes, branches and festoons of flowers and fruits. Inside the pergola, there are painted 16 oval openings from which groups of putti overlook. Below the mentioned openings, on the vertical walls there are as many monochrome lunettes which simulate niches containing statues of mythological figures. A frieze with painted capitals, each composed of two ram’s heads facing each other and holding various objects (clothes, dishes, etc.), encloses all the decoration (fig. 02). On the fireplace, there is also painted the goddess Diana on a chariot, a clear reference to the abbess Giovanna who commissioned the decoration.

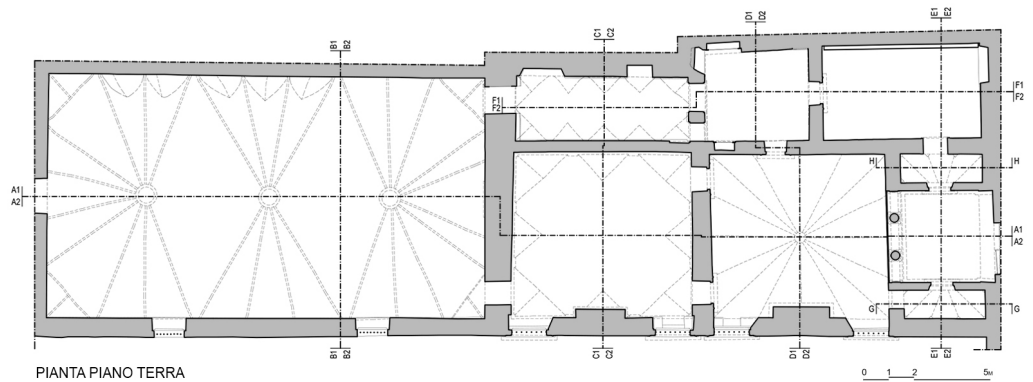


Fig. 01. The ground floor of the museum itinerary (+1.70 m). Original scale of the drawing 1:50. Graphic elaboration by the authors.



Fig. 02. Particular of the frescoes painted by Correggio (on the left) and those attributed to Araldi (on the right). Author photographs.

Next to the *Chamber of the Abbess* there is another room of great artistic value, probably frescoed by Alessandro Araldi in 1514. Here, the pavilion vault with lunettes presents an extraordinary grotesque decoration. At the center of the vault, there is painted a balustrade open to the blue sky, from which musician putti appear. Since 21 April 2021, the management of this museum itinerary has changed and passed to the Municipality, which engaged a specialized company to proceed with the restoration of the “Camera di San Paolo” and the “Cella di Santa Caterina”.

To this aim, an accurate survey campaign of all vertical and vaulted surfaces was necessary (in a scale 1:50). Deep knowledge of the spaces and their state of conservation was essential for the restoration project. In this regard, the restorers needed reliable drawings as a support. In particular, plans and sections of the entire museum itinerary and orthophotos of all the vertical walls and vaults (in scale 1:50) were required.

The integrated survey

In order to provide the required documentation, it was decided to carry out an integrated survey campaign. All activities were performed in June 2021 and both laser scanner and photogrammetric techniques were adopted. TLS technique results more suitable for surveying interior spaces with complex geometry, but the photogrammetric one ensures greater accuracy in terms of radiometric data. A Leica RTC360 laser scanner equipped with a 36 Mpixel HDR camera was used for the laser scanner survey. Starting from the cloister adjacent to the museum itinerary, a total of 41 scans were made. For each room, two or three station points were identified. Their number depended on the complexity and richness of the decorative apparatus and their position was decided paying attention to the maximum reduction of occlusions. The chosen resolution was of 6 mm at 10 m distance. Taking into consideration the small size of the rooms, the adopted resolution was adequate to ensure accurate results. In order to guarantee proper data registration, additional scans were placed in passage areas. Taking advantage of the camera integrated in the laser scanner, 36 images with a resolution of 4000x3000 pixels were acquired for each scan, which the instrument returns as spherical images. At the end of the survey operations, the collected data were registered in a unique reference system within the Leica Cycle software. In this way, a unique point cloud of the entire complex was obtained (fig. 03). At the same time, the equirectangular images acquired by the laser scanner were exported (fig. 04). In parallel to the laser scanner survey, a photogrammetric survey was carried out using a full-frame Nikon D3X DSLR. This camera is capable of taking images with a resolution of 6048x4032 pixels and was equipped with 35 mm or 24 mm optic, depending on the size of the rooms to be surveyed. In order to ensure uniformity from a radiometric point of view, all photographs were taken under artificial light conditions and a color calibration card was used. The camera was mounted on a tripod and the images were acquired using a wired remote control. For each vertical wall three horizontal strips were acquired. Additional oblique images were taken at the corners. For all the vaults, instead, two strips were made at different heights. Also in this case, additional oblique images were taken. By way of example, in each of the two most important rooms of the complex (the one attributed to Araldi and the one frescoed by Correggio) about 170 photos were taken.

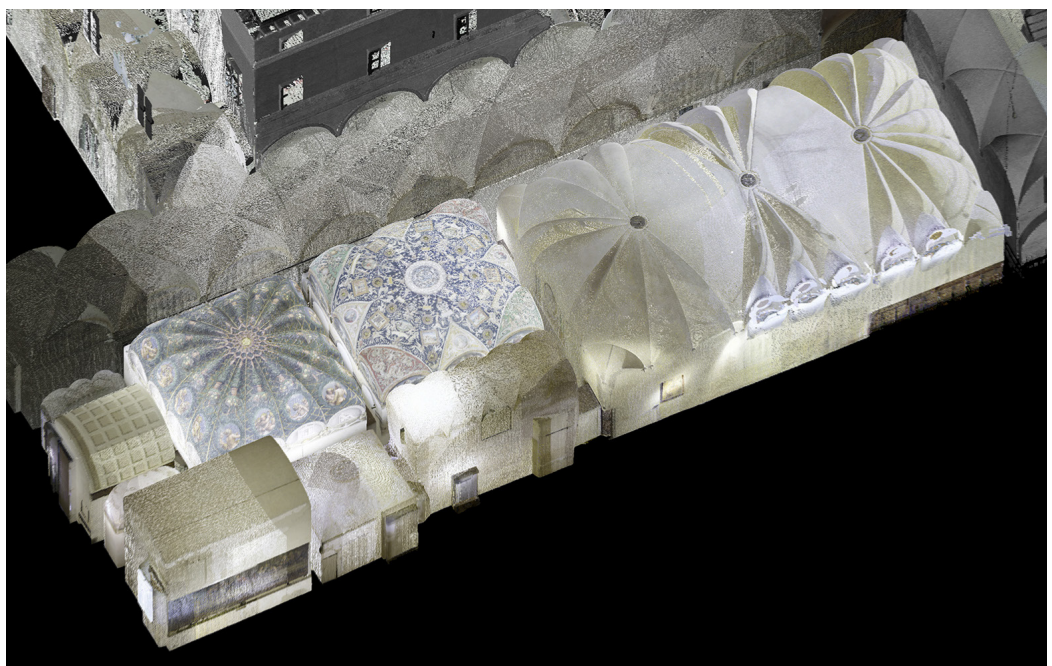


Fig. 03. Point cloud of the entire museum itinerary, obtained from the laser scanner survey. Graphic elaboration by the authors.

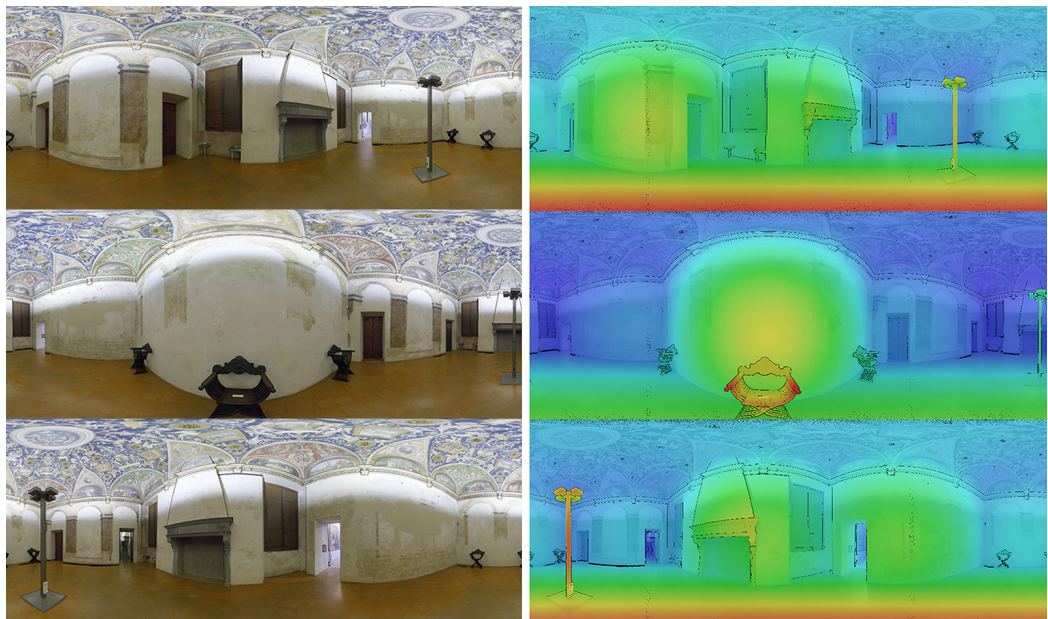
The methodology and data processing

The first operation carried out on the registered point cloud regarded its division in nine parts, each corresponding to a single room. The purpose of this division was to obtain smaller files to manage. Each part was then exported in .E57 format and imported into the Metashape software. The latest versions of the Agisoft software are able to perform a pre-processing in which each single scan is converted into an equirectangular image (format .tif). Once imported, the point clouds were then transformed into RGB spherical panoramas with corresponding depth maps and External Orientation (EO) parameters (position principal point location and camera rotation), known and derived directly from the laser scanner survey (fig. 05).

The second operation regarded importing the frame images into the photogrammetric workspace. Since these images lack of EO parameters, a standard image matching process between frame images and the previously mentioned spherical panoramas was performed. In this phase, the EO parameters of the spherical panoramas have been kept fixed and used as a reference. The aim was to generate a single photogrammetric block in which the reference system and scale are determined directly from the External Orientation parameters derived from the laser scanner survey. The principal benefit of this methodology is that there is no need of any Ground Control Point (GCP). It also avoids the need to co-register data obtained from the TLS survey and those produced by photogrammetry, which as said before, is the most common workflow.

At this point of the pipeline, in a traditional photogrammetric process based on the use of Metashape, would follow a process of dense matching between all the images of the block. This process would allow to obtain a point cloud to be used as a support for the mesh model elaboration. However, doing so would cancel the depth information derived from the laser scanner survey and the accuracy of the geometric data could be altered. In the workflow presented in this paper, it was decided to avoid the traditional approach of making a dense point cloud and to reconstruct the mesh model using directly the depth maps of the panoramas. In this way it was possible to generate a mesh in which the geometric data is derived entirely and exclusively from the data collected by laser scanner (fig. 06).

Once the mesh model was completed, it was possible to proceed with the generation of the orthophotos. As already mentioned, frame images are oriented in coherence with equirectangular images.



Figs. 04, 05. Equirectangular images and related depth maps obtained from laser scans carried out in the room frescoed by Araldi. Graphic elaboration by the authors.

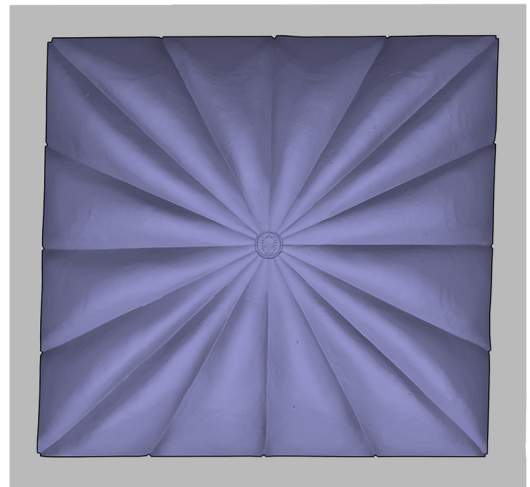
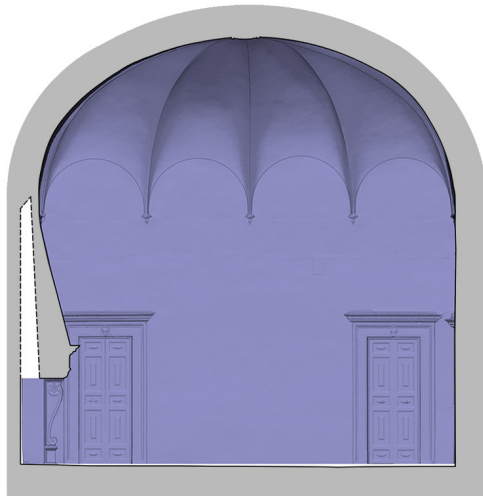


Fig. 06. Details of the Chamber of the Abbess mesh model (on the left: the east wall; on the right: the vault). Graphic elaboration by the authors.



Fig. 07. Comparison between the orthophotos obtained using the radiometric information provided by the laser scanner (left part of the images) and those by the photogrammetric survey (right part of the images). Graphic elaboration by the authors.

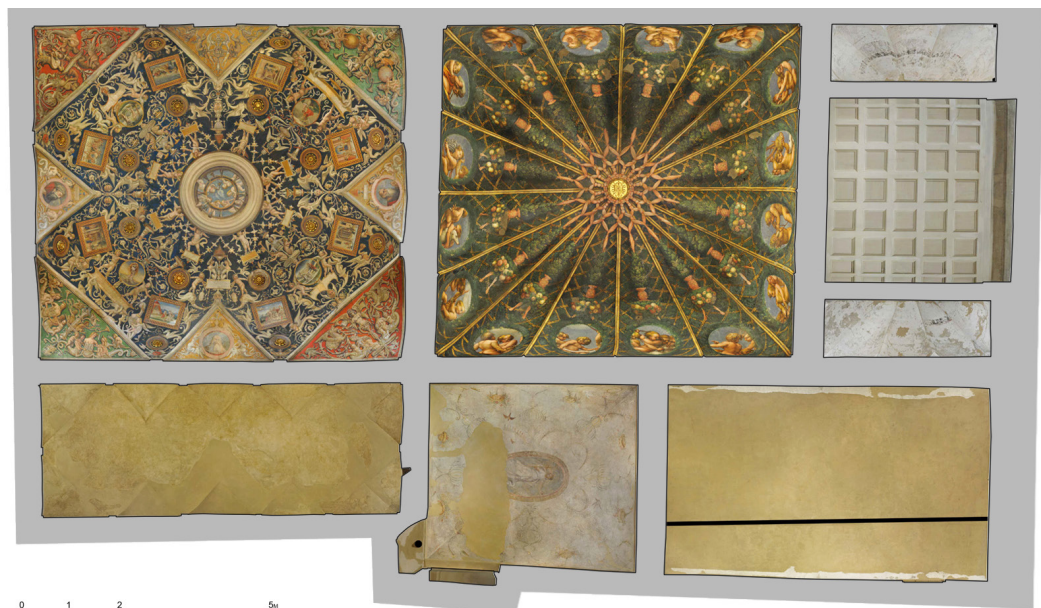


Fig. 08. Particular of the ceiling plan. Original scale of the drawing 1:50. Graphic elaboration by the authors.



Fig. 09. Particular of the section A2-A2. Original scale of the drawings 1:50. Graphic elaboration by the authors.

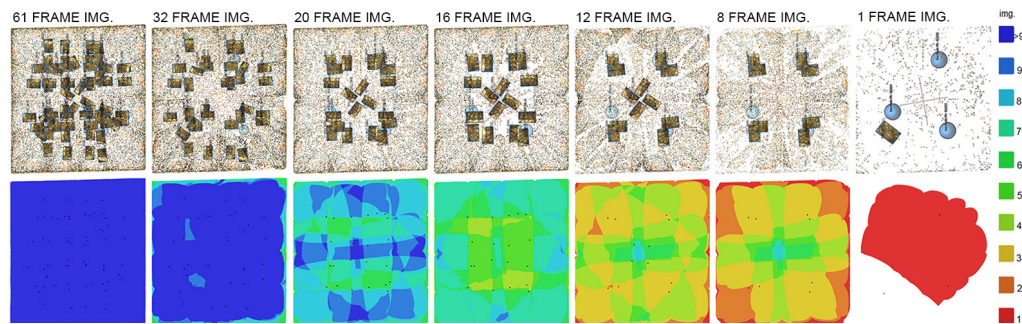


Fig. 10. Validation of the accuracy of results as the number of frame images used decreases. The image summarizes the tested block geometries and the relative images overlap. Graphic elaboration by the authors.

Thanks to this, for the generation of orthophotos it was possible to use only and exclusively the frame images, which allow to provide a higher quality radiometric data than those obtained using the integrated camera of the laser scanner (fig. 07). A total of 42 high-resolution orthophotos were obtained: one for each vertical wall, one for each vault and one for the floor of the *Chamber of the Abbess*. The resolution obtained (1 mm/pix) is much higher than what is necessary for drawings with a scale of 1:50. However, in the context of a restoration project, all details are important. The orthophotos were then integrated into the traditional survey drawings. In this case, two plans at +1.70 m above the floor of the *Chamber of the Abbess* (floor plan and ceiling plan) and fourteen vertical sections were obtained and used as a support for restoration activities (figs. 08, 09).

Conclusions

The proposed methodology presents some undoubted advantages. First of all, as already illustrated, it allows to obtain orthophotos characterized by a high level of precision of the geometric data (since they derive from the TLS survey) and, at the same time, by the accuracy of the radiometric data (obtained from the photogrammetric survey). In addition, it allows the correct orientation of the frame images without the need to GCP. This is particularly useful in all those cases where, for various reasons, it is impossible to place targets in advance (for example, in the case of surfaces of high artistic value, parts that cannot be reached directly, etc.). It is also more advantageous in terms of time for data acquisition. Finally, another advantage offered by the method proposed here is that of being able to reduce the number of images that would normally be required by the software in order to orientation operations (fig. 10) and, above all, to obtain an accurate mesh model.

The latter, in fact, is directly derived from the TLS data. Despite its apparent simplicity, at the moment the methodology illustrated have not yet found numerous applications. The survey presented here was therefore also an opportunity to test and validate the proposed methodology [Bruno et al. 2022]. In fact, additional tests have been carried out on two rooms: the *Chamber of the Abbess* and the one whose frescoes are attributed to Araldi. These tests made it possible to verify the accuracy of the results in comparison with a traditional co-registration approach based on the use of GCP and to test the robustness of the method even under different conditions, for example by reducing the number of frame images used. All tests carried out so far demonstrated that the accuracy of the orthophotos generated with the proposed methodology is at least equal to the one obtained using established procedures.

References

- Bruno, N. et al. (2022). Integrated processing of photogrammetric and laser scanning data for frescoes restoration. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XLVI-2/W1-2022. Proceedings of the 9th Intl. Workshop 3D-ARCH 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. Mantova, 2-4 marzo 2022, pp. 105-112.
- Community Research and Development Information Service (2021). *Results Pack on digital cultural heritage. How digital technologies can play a vital role for the preservation of Europe's cultural heritage.* <<https://cordis.europa.eu/article/id/413473-how-digital-technologies-can-play-a-vital-role-for-the-preservation-of-cultural-heritage>>. (consultato il 6 novembre 2021).
- European Commission (2018). *Cultural Heritage: Digitization, online accessibility and digital preservation. Consolidated Progress Report on the implementation of Commission Recommendation (2011/171/UE) 2015-2017.* <<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-commission-report-cultural-heritage-digitisation-online-accessibility-and-digital>> (consultato il 6 novembre 2021).
- Fadda, E. (2018). *Come in un rebus. Correggio e la Camera di San Paolo.* Firenze: Leo S. Olschki Editore.
- Fiorillo, F. et al. (2021). Integrazione dei dati acquisiti con sistemi image-based e range-based per una rappresentazione 3D efficiente. In *Arena A. et al. (a cura di). Connettere. Un disegno per annodare e tessere.* Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Reggio Calabria, 16-18 settembre 2021, pp. 2319-2337. Milano: FrancoAngeli.
- Luhmann, T. et al. (2020). Fusion of UAV and Terrestrial Photogrammetry with Laser Scanning for 3D Reconstruction of Historic Churches in Georgia. In *Drones*, n. 4, 53.
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D scanning. In *Remote Sensing*, 3(6), pp. 1104-1138.
- Terrestrial laser scanning data processing. (8 febbraio 2021). <<https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000159101-terrestrial-laser-scanning-data-processing>> (consultato il 6 novembre 2021).
- Valente, R. et al. (2019). Documentation of historical architectures through the combined use of digital surveying techniques. In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XLII-2/W11. Atti del 2nd International Conference of Geomatics and Restoration GEORES 2019, Milano, 8-10 maggio 2019, pp. 1121-1125.

Authors

Andrea Zerbi, Università di Parma, andrea.zerbi@unipr.it
Sandra Mikolajewska, Università di Parma, sandra.mikolajewska@unipr.it

To cite this chapter: Zerbi Andrea, Mikolajewska Sandra (2022). Tecniche integrate di rilievo fotogrammetrico e TLS per la documentazione di architetture dipinte/Integrated techniques of photogrammetric survey and TLS for the documentation of frescoed architectures. In Battini C., Bistagnino E. (a cura di). *Dialoghi. Visioni e visualità. Testimoniare Comunicare Sperimentare.* Atti del 43° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Dialogues. Visions and visuality. Witnessing Communicating Experimenting. Proceedings of the 43rd International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 2980-2995.