

# LA SALA CAPITOLARE DELLA SCUOLA GRANDE DI SAN ROCCO A VENEZIA: PROBLEMATICHE E SOLUZIONI PER IL RILIEVO DEL SOFFITTO

## THE SALA CAPITOLARE OF THE SCUOLA GRANDE DI SAN ROCCO IN VENICE: PROBLEMS AND SOLUTIONS FOR THE CEILING'S SURVEY

B. Bertellini<sup>a</sup>, C. Gottardi<sup>a</sup>, G. Romagna<sup>a</sup>, P. Vernier<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratorio di Fotogrammetria, Sistema dei Laboratori, Università Iuav di Venezia, Santa Croce 191, 30135, Venezia, Italia -  
bbertellini@iuav.it; cgottardi@iuav.it; gianlukka@live.it; vernier@iuav.it

**PAROLE CHIAVE:** Rilievo, Beni Culturali, Laser Scanning, Fotogrammetria

**KEY WORDS:** Survey, Cultural Heritage, Laser Scanning, Photogrammetry

### RIASSUNTO

Negli ultimi anni, grazie al rapido e continuo sviluppo tecnologico, il rilievo metrico ha avuto un notevole incremento nell'ambito della digitalizzazione e valorizzazione del patrimonio culturale. Da sempre, il Laboratorio di Fotogrammetria dell'Università Iuav di Venezia ha dimostrato particolare interesse per la documentazione di strutture lignee con peculiari complessità geometriche, sviluppando, nel tempo e attraverso differenti casi studio, una procedura operativa per l'analisi di tali tecniche costruttive. Nello specifico, in questo lavoro di ricerca verrà descritta la metodologia utilizzata per il rilievo del soffitto della Sala Capitolare della Scuola Grande di San Rocco a Venezia.

In occasione del cinquecentesimo anniversario della nascita di Tintoretto, autore del ciclo pittorico presente *in loco*, si è ritenuto necessario incrementare le informazioni riguardanti la Scuola Grande, realizzando un'analisi approfondita della struttura del soffitto attraverso un accurato rilievo metrico.

La complessità dell'oggetto, le sue notevoli dimensioni, la ricchezza di decorazioni e le particolari condizioni di illuminazione, hanno richiesto l'integrazione di diverse tecniche di acquisizione, al fine di ottenere un risultato metrico adeguato per lo studio della struttura nella sua interezza. La conformazione della Sala ha causato diverse complicazioni durante la campagna di rilevamento, comportando alcune scelte non convenzionali nelle fasi di lavoro: la ricerca qui presentata analizza le difficoltà incontrate e illustra le soluzioni adottate al fine di risolvere tali problematiche e studiare la complessità geometrica del soffitto della Sala Capitolare.

### ABSTRACT

In recent years, thanks to a rapid and continuous technological development, the metric survey has had a significant increase in the digitization and enhancement of Cultural Heritage. Since ever, the Photogrammetry Laboratory of the Iuav University of Venice was interested in documenting wooden structures with peculiar geometrical complexities; over time and through different case studies, we had developed an operational procedure for the analysis of these construction techniques. Specifically, in this research work it will be described the methodology used to survey the ceiling of the *Sala Capitolare* of the *Scuola Grande di San Rocco* in Venice.

On the occasion of the 500th anniversary of the birth of Tintoretto, the painter of the pictorial canvas on site, it was decided to increase the information regarding the *Scuola Grande*, carrying out an in-depth analysis of the ceiling structure through an accurate metric survey.

The complexity of this venetian architecture, its considerable dimension, the richness of decorations and the particular lighting conditions have required the integration of different acquisition techniques in order to obtain an adequate metric result for the study of the structure in its entirety. The architectural complexity of the *Scuola* caused various problems during the survey campaign, resulting in some unconventional choices in the work phases: the research presented here analyses the difficulties encountered and it illustrates the solutions chosen in order to solve them and to study the geometric complexity of the ceiling of the *Sala Capitolare*.

### 1. INTRODUZIONE

Lo studio e la conoscenza dei beni architettonici e artistici sono prerogative di ogni attività di salvaguardia e tutela del patrimonio culturale. La conoscenza approfondita dell'architettura del costruito, assieme alla ricerca storica e all'analisi interpretativa dei materiali, consentono, infatti, la conservazione e la valorizzazione del bene in analisi. Negli ultimi anni, grazie al rapido e continuo sviluppo tecnologico, il rilievo metrico ha avuto un notevole incremento nell'ambito della digitalizzazione e valorizzazione del patrimonio culturale (Calantropio *et al.*, 2018; Tucci *et al.*, 2016; Balletti *et al.*, 2015; Kwiatek *et al.*, 2015; Bitelli, 2002): l'acquisizione digitale consente, infatti, di

studiare alcuni aspetti altresì difficili da approfondire nel dettaglio. L'analisi della forma e della geometria di un oggetto è, inoltre, fondamentale per conoscere il suo stato di conservazione e per progettare eventuali interventi di restauro.

In questo lavoro di ricerca verrà descritta la metodologia utilizzata per il rilievo del soffitto della Sala Capitolare della Scuola Grande di San Rocco a Venezia, ponendo particolare attenzione alla struttura di sostegno delle tele di Tintoretto, ancorata al sistema di capriate palladiane. Da sempre, il Laboratorio di Fotogrammetria dell'Università Iuav di Venezia ha dimostrato particolare interesse per la documentazione di strutture lignee con peculiari complessità geometriche, sviluppando, nel tempo e attraverso differenti casi studio, una

procedura operativa per l'analisi di tali tecniche costruttive (Balletti *et al.*, 2014; Balletti *et al.*, 2013; Balletti *et al.*, 2003). L'estrema importanza del manufatto nel contesto veneziano, assieme alla conformazione articolata che lo contraddistingue, ha richiesto, innanzitutto, un approfondito studio preliminare di tale architettura. Una fabbrica storica è, infatti, un sistema costruttivo-spaziale complesso, in cui risultano strettamente connessi elementi visibili e parti interne celate all'occhio dell'osservatore, in un continuo sovrapporsi di fasi costruttive differenti. Per questo motivo, rilevare un bene architettonico storico comporta spesso delle difficoltà nella fase di acquisizione metrica, che necessita una progettazione dettagliata delle operazioni di misura. Il collegamento tra i diversi ambienti, le particolari condizioni di illuminazione e l'utilizzo dello spazio da parte dei visitatori hanno reso la campagna di rilevamento complessa, creando occasioni di riflessione relative alle soluzioni da adottare di volta in volta.

A oggi, le tecniche di rilevamento vengono spesso integrate assieme al fine di ottenere un risultato metrico adeguato alla scala di rappresentazione richiesta (Murtiyoso *et al.*, 2018; Kadobayashi *et al.*, 2004): le nuvole di punti, ottenute per via fotogrammetrica o laser scanning, forniscono una descrizione geometrica e qualitativa del dato rilevato, consentendo ulteriori indagini, soprattutto dal punto di vista conservativo. La grande mole di dati acquisiti può, inoltre, essere successivamente utilizzata, da un lato, come un vero e proprio database per i beni culturali, fornendo la base per la costruzione di modelli tridimensionali interrogabili (*Historical Building Information Model - HBIM*) e, dall'altro, per applicazioni museali di fruizione e visualizzazione per un ampio pubblico, attraverso applicazioni di realtà virtuale o immersiva (Bolognesi *et al.*, 2018; Scandurra *et al.*, 2018).

Il lavoro presentato è stato suddiviso in diverse fasi: nella prossima sezione vengono brevemente descritti alcuni cenni storici, fondamentali per il processo di conoscenza del manufatto. Successivamente, nella terza sezione, viene descritta la fase di acquisizione ed elaborazione dei dati metrici, con le relative difficoltà incontrate e le soluzioni adottate al fine di risolvere tali problematiche. Come vedremo, le criticità maggiori sono state riscontrate nel rilievo fotogrammetrico delle tele, prevalentemente a causa delle particolari condizioni di illuminazione della Sala. Il rilievo degli affreschi è un tema molto affascinante quanto complesso e consente, al tempo stesso, la sperimentazione di metodi innovativi di acquisizione (Nocerino *et al.*, 2018; Webb *et al.*, 2018; Borgogno Mondino *et al.*, 2005). Da molti anni, ormai, la Geomatica permette di integrare e migliorare l'indagine qualitativa dei dipinti attraverso i metodi della fotogrammetria digitale, in grado di fornire rappresentazioni grafiche corrette assieme a una accurata conoscenza delle caratteristiche figurative degli apparati decorativi (Chiabrando *et al.*, 2014; Apollonia *et al.*, 2010; Armetta *et al.*, 2009). Particolare attenzione viene dunque posta alle difficoltà riscontrate in questo rilievo e alle soluzioni adottate per risolverle. Nel quarto paragrafo vengono descritte le rappresentazioni finali ottenute in seguito all'elaborazione dei dati. La realizzazione di un'ortofoto ad alta definizione e con una elevata accuratezza metrica è, fin da subito, risultata imprescindibile per la documentazione delle tele; questa, unita ai disegni vettoriali, ha consentito di rappresentare lo stato di conservazione della Sala Capitolare e del soffitto decorato per programmare gli interventi necessari di manutenzione e restauro. Alla fine della procedura, nell'ultima sezione, vengono presentate alcune considerazioni conclusive, sottolineando l'importanza di individuare delle procedure operative per la conservazione dei beni culturali ed evidenziando possibili sviluppi futuri di questo lavoro di ricerca.

## 2. LE SCUOLE GRANDI A VENEZIA

A partire dalla seconda metà del Duecento, nell'Italia centro-settentrionale nacquero numerose confraternite composte da laici con finalità di culto e di mutuo soccorso; a Venezia queste aggregazioni presero il nome di Scuole (Pullan, 1982).

Le Scuole ebbero una funzione molto importante nell'ambito della vita religiosa e dell'assistenza caritativa in città. Molte di queste erano corporazioni professionali (di arti e mestieri), altre di nazionalità e, altre ancora, di devozione, tra cui quelle dei Battuti; queste ultime presero il nome di Scuole Grandi. Le Scuole Grandi ebbero un ruolo fondamentale nella politica e nella società veneziana; sembra dunque inconcepibile pensare che un'organizzazione così importante vide la sua origine fuori dai confini della Serenissima, da un movimento ascetico di flagellanti fondato a Perugia attorno al 1260 (Howard, 1999).

Le Scuole Grandi a Venezia sono: Santa Maria della Carità, la più antica, San Giovanni Evangelista, Santa Maria in Valverde o della Misericordia, San Marco, San Teodoro e, infine, San Rocco (Sansovino, 1581).

### 2.1 L'arciconfraternita di San Rocco

Tra la fine del XIII e l'inizio del XIV secolo, moltissime città furono colpite da forti epidemie di peste, tra cui anche la Repubblica di Venezia.

Dopo il Concilio di Costanza (tenutosi tra il 1414 e il 1418), molte città d'Italia, a causa dell'incapacità di fare fronte a tale epidemia, decisero di istituire delle confraternite per guadagnarsi il patrocinio del santo guaritore del morbo, ossia San Rocco. A Venezia, il primo atto pubblico che decreta le origini dell'Arciconfraternita è datato al 30 novembre 1478 ed è contenuto nella *Mariogola*, una raccolta delle norme che avrebbero gestito la nuova comunità, approvata dal Consiglio dei Dieci (Tonon, 1998). L'arciconfraternita venne poi elevata al rango di Scuola Grande nel 1489.

### 2.2 La fabbrica della Scuola Grande



Figura 1. La facciata esterna della Scuola Grande di San Rocco

Nei primi anni, la Scuola di San Rocco (Fig. 1) subì diversi spostamenti di sede: solo nel 1486, otto anni dopo la sua istituzione, l'arciconfraternita trovò la sua sede definitiva vicino alla chiesa dei Frari (Tonon, 1999).

La storia costruttiva dell'attuale corpo di fabbrica della Scuola si articola in diverse fasi, che rispecchiano il susseguirsi di altrettanti *proti* con l'incarico di direzione dei lavori: Pietro Bon tra il 1517 e il 1524, Sante Lombardo, con la supervisione del padre Tullio, tra il 1524 e il 1527, e Antonio Abbondi, detto lo Scarpagnino, dopo il 1527 (Guidarelli, 2002; Soravia, 1824).

Gli interventi si conclusero nel 1560, con a capo il direttore dei lavori Giangiacomo de' Grigi, che si occupò del tetto, della

costruzione di lucernai e abbaini e della scala a chiocciola di accesso al sottotetto.

### 2.3 Tintoretto e il ciclo pittorico della Sala Capitolare

Jacopo Robusti, detto il Tintoretto (1519-1594), è considerato, assieme a Tiziano e Veronese, uno dei tre grandi artisti della pittura veneziana del Cinquecento. Figlio di Gian Battista tintore di sete, da cui l'appellativo "Tintoretto", secondo la tradizione frequentò la bottega del celebre Tiziano e già a vent'anni divenne un maestro indipendente svolgendo numerosi lavori a Venezia. Sebbene l'architettura della Scuola si possa ritenere conclusa già a metà Cinquecento, la decorazione interna rimaneva ancora in sospeso. Nel 1564 la Scuola decise di indire un concorso per la decorazione della Sala dell'Albergo e chiamò i quattro artisti più attivi a Venezia: Veronese, Salvati, Zuccari e Tintoretto. Fu proprio quest'ultimo a prevalere sugli altri, realizzando la tela e montandola durante la notte con la complicità dei guardiani, mentre gli altri stavano ancora completando le bozze di studio da presentare (Romanelli, 1994). L'incarico venne dunque affidato a Tintoretto, il quale venne chiamato anche successivamente, tra il 1575 e il 1577, per la realizzazione del ciclo pittorico del soffitto della Sala Capitolare (Fig. 2).

Gli interventi del pittore veneziano a San Rocco rappresentano uno di momenti più alti della sua carriera, tanto che la Sala Capitolare è stata definita dallo storico Giandomenico Romanelli la "Cappella Sistina di Venezia".



Figura 2. La Sala Capitolare della Scuola Grande di San Rocco

### 3. IL RILIEVO DELLA SALA CAPITOLARE

In occasione del cinquecentesimo anniversario della nascita di Tintoretto, la Scuola Grande ha ritenuto necessario incrementare le informazioni sulla fabbrica, in particolar modo per ciò che concerne il soffitto decorato, attraverso un'analisi approfondita della struttura nella sua completezza.

La complessità dell'oggetto, le sue notevoli dimensioni, la ricchezza di decorazioni e le particolari condizioni di illuminazione hanno richiesto l'integrazione di diverse tecniche di acquisizione al fine di ottenere un risultato metrico adeguato per lo studio della struttura nella sua interezza. Nello specifico, il lavoro ha interessato tre ambienti diversi che compongono l'oggetto: la Sala Capitolare, uno spazio visitabile ampio e ricco di decorazioni, il sottotetto, suddiviso in tre navate e scandito da 28 capriate palladiane, e lo spazio interstiziale che ne risulta, in cui prende posto tutto il sistema di sostegno del soffitto ligneo; i tre ambienti sono collegati tra loro solo da una stretta e ripida scala a chiocciola. La particolare conformazione della Scuola ha causato diverse complicazioni durante la campagna di rilevamento, comportando alcune scelte non convenzionali nelle diverse fasi di lavoro; in questo modo è stato possibile

rappresentare e studiare la complessità geometrica del soffitto della Sala Capitolare della Scuola Grande di San Rocco.

Nei paragrafi successivi viene descritto lo svolgimento della campagna nella Scuola, analizzando le difficoltà incontrate e illustrando le soluzioni adottate al fine di risolvere tali problematiche.

### 3.1 Il rilievo topografico

La prima operazione è consistita nella definizione della rete topografica, al fine di materializzare un sistema di riferimento locale su cui referenziare tutte le successive acquisizioni laser scanning e fotogrammetriche; le misure sono state effettuate con la stazione totale Leica TCR 1103. L'unico collegamento tra gli ambienti della Sala Capitolare e quelli della copertura lignea è costituito da una stretta e ripida scala a chiocciola: progettare ed effettuare la rete topografica all'interno della scala avrebbe causato molte difficoltà nella messa in stazione degli strumenti, comportando un prolungamento delle operazioni e una propagazione elevata dell'errore. Si è quindi pensato di creare un collegamento diretto tra gli spazi, attraverso la rimozione di alcuni riquadri presenti nella cornice lignea e la creazione di tre botole nel piano di calpestio del sottotetto.

Sono stati materializzati tre capisaldi a terra nella Sala Capitolare, impostando così la rete principale del rilievo topografico. Nel sottotetto, lo strumento è stato messo in stazione sugli stessi capisaldi nella Sala, grazie all'apertura delle botole precedentemente descritte; la coordinata Z, ossia la quota, dei punti di stazione nel sottotetto è stata ottenuta calando una cordella metrica dall'alto attraverso il soffitto e risulta quindi pari alla distanza tra i punti a terra e il centro dello strumento (Fig. 3). Tale distanza è stata verificata anche con l'utilizzo di un distanziometro laser.



Figura 3. Rimozione del riquadro ligneo per collegare topograficamente la Sala e il sottotetto

Contemporaneamente alla rete topografica principale, è stato realizzato un rilievo celerimetrico dei target per ottenere le coordinate di alcuni punti necessari alla referenziazione delle scansioni laser scanning; a questo scopo, sono stati posizionati nei due ambienti numerosi target di formato A4 con una scacchiera bianca e nera, facilmente riconoscibili in maniera semi-automatica dal software di processamento dei dati.

Le osservazioni sono state compensate attraverso il metodo dei minimi quadrati all'interno del software *StarNet* (MicroSurvey StarNet). Alla fine della procedura si è ottenuta una deviazione standard sulle coordinate di circa  $\pm 2$  mm.

### 3.2 Il rilievo laser scanning

Il rilievo laser scanning consente una rapida digitalizzazione e una facile visualizzazione, direttamente in un ambiente tridimensionale, degli oggetti rilevati attraverso la creazione di una nuvola di punti, di cui sono noti la posizione e il valore radiometrico espresso in RGB.

Il soffitto ligneo, la Sala Capitolare e la struttura di sostegno delle tele sono state acquisite attraverso l'uso del laser scanner a

differenza di fase *Faro Focus 3D S120* (CAM2 Faro Focus 3D), caratterizzato da tempi di acquisizione fino a 976000 punti al secondo e da precisioni nella misura di distanza pari a  $\pm 2$  mm in un range da 0.6 a 120 m. Le scansioni sono state acquisite con un passo angolare di  $0.035^\circ$ , in modo da garantire l'acquisizione di un punto ogni 6 mm a 10 m di distanza.

Il numero di scansioni dipende da diversi fattori, quali le dimensioni dell'oggetto e la presenza di ingombri, che possono causare zone d'ombra. Nella Sala Capitolare, date le notevoli dimensioni (circa 42x16.5 m), sono state acquisite 25 scansioni, mentre nel sottotetto, a causa della presenza delle capriate e della geometria più articolata, sono state acquisite un totale di 136 scansioni (Fig. 4).

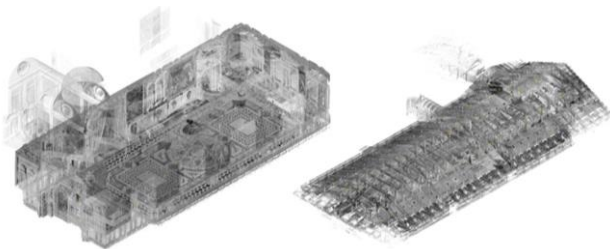


Figura 4. Le nuvole di punti laser scanning della Sala Capitolare (a sinistra) e del sottotetto (a destra)

La presenza del tavolato al di sopra delle catene delle capriate ostacolava l'osservazione delle parti sottostanti, ossia dello spazio interstiziale in cui prende posto il sistema di sostegno del soffitto ligneo, compresi gli ancoraggi dei teleri. Per ottenere le informazioni necessarie sono state progettate delle scansioni all'interno delle botole create per l'appoggio topografico, posizionando il laser ruotato di  $180^\circ$  (Fig. 5).

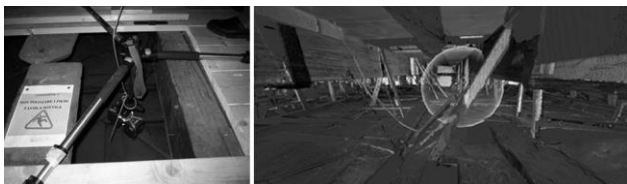


Figura 5. Il laser scanner ruotato e la zona interstiziale rilevata

L'utilizzo del laser scanner risulta indispensabile per il rilievo in situazioni di scarsa o nulla illuminazione come, per l'appunto, nel sottotetto: lo strumento infatti acquisisce l'intensità del segnale di ritorno (*intensity*) del laser, consentendo di registrare le informazioni sulla geometria dell'oggetto anche in assenza di luce. La registrazione delle diverse nuvole e la referenziazione nel sistema di riferimento locale sono state possibili grazie al riconoscimento dei target rilevati topograficamente e, laddove necessario, di alcuni punti architettonici: è stata applicata dunque una rototraslazione nello spazio di ogni nuvola nel sistema locale. Nel caso delle scansioni effettuate nella zona interstiziale, invece, non è stato possibile determinare delle coordinate direttamente per via topografica; sono stati quindi individuati, in fase di elaborazione, alcuni punti omologhi di coordinate note, ossia identificati in altre scansioni precedentemente referenziate. In questo modo, alla fine della procedura, è stato possibile visualizzare tutte le scansioni all'interno del medesimo sistema di riferimento topografico.

L'elevato numero delle scansioni e la loro vicinanza all'oggetto in analisi hanno consentito di ottenere una nuvola molto densa per un totale di quasi sette miliardi (6937060436) di punti; il problema principale di una mole di dati così grande è la difficoltà nel gestire le informazioni in fase successiva. Per la registrazione delle scansioni è stato utilizzato il software *Scene* (CAM2

*Scene*): il programma riconosce facilmente alcuni sistemi di segnalazione, come i target a scacchiera bianca e nera e le sfere (diametro 12 cm). Questi sistemi sono stati entrambi utilizzati nel sottotetto, mentre solo il primo nella Sala Capitolare. Alla fine della procedura, i punti usati per la registrazione delle scansioni presentavano dei residui in media di circa  $\pm 4$  mm.

### 3.3 Il rilievo fotogrammetrico

La parte più consistente del lavoro ha riguardato l'acquisizione fotogrammetrica e la successiva creazione dei modelli del ciclo pittorico di Tintoretto. Il soffitto è stato dunque rilevato anche attraverso il metodo fotogrammetrico, utilizzando la camera digitale Nikon D800 con ottica fissa AF-S Nikkor 50 mm.

La campagna fotografica è stata suddivisa in più giornate, date le dimensioni della Sala e le numerose problematiche riscontrate, tra cui le particolari condizioni di illuminazione (Fig. 6), la costante apertura al pubblico, la presenza di ingombri e il fatto che contemporaneamente alla campagna di rilievo fossero in corso alcuni lavori di restauro e manutenzione.



Figura 6. Il sistema di illuminazione della Sala Capitolare

Lo schema di presa adottato per il rilievo fotogrammetrico del soffitto ha previsto l'acquisizione di strisciate trasversali e longitudinali, mantenendo l'asse ottico della camera sia perpendicolare che inclinato di  $45^\circ$  rispetto alle tele, con una sovrapposizione longitudinale del 60% e trasversale del 50%. Le prese sono state progettate per ottenere un GSD finale pari a 1 mm a una distanza di presa di circa 10 metri.

Il modello fotogrammetrico è stato formato a partire dai 1167 fotogrammi elaborati con *Photoscan Professional* (Agisoft Photoscan). La geometria di presa regolare e la ridondante sovrapposizione tra le foto hanno permesso di generare una nuvola di punti completa, utilizzata successivamente per la generazione della mesh e della texture (Fig. 7).



Figura 7. Le differenti fasi di elaborazione in Photoscan. Da sinistra: la nuvola sparsa, la nuvola densa, la mesh e la texture

In fase di elaborazione, soprattutto in corrispondenza dei portali e dei timpani, sono stati riscontrati alcuni problemi nella creazione della texture, in quanto l'oggetto di questi elementi nascondeva le parti sovrastanti del soffitto. È stata quindi effettuata una pulizia del modello fotogrammetrico, eliminando tutti i punti non appartenenti al soffitto ligneo. Dove questa operazione non è stata sufficiente, sono state applicate delle

maschere di ritaglio sulle singole immagini, per poi generare nuovamente la texture. Nonostante l'avanzato livello di automazione del software, questo passaggio ha richiesto, dato l'elevato numero di fotogrammi, una lunga fase di lavoro preliminare al fine di ottenere un risultato finale accettabile.

I parametri dell'orientamento interno sono stati calcolati assieme a quelli dell'orientamento esterno relativo e quindi simultaneamente alla costruzione del modello fotogrammetrico (auto-calibrazione). Per l'orientamento assoluto sono stati individuati 10 punti di appoggio distribuiti in modo omogeneo su tutta la superficie: le coordinate sono state ricavate direttamente dalla nuvola di punti laser scanning. Si è deciso di optare per tale modalità, e non di ricavare le coordinate direttamente dal rilievo topografico con la stazione totale, a causa delle complesse condizioni di operatività riscontrate: infatti, la continua presenza di visitatori e di interventi di manutenzione all'interno della Scuola ha determinato una riduzione dei tempi di acquisizione metrica sul campo; ciò ha comportato una scelta dei punti da acquisire topograficamente e si è optato per collimare solo i target posizionati nei relativi ambienti.

Dopo aver applicato, dunque, una rototraslazione con variazione di scala alla fine della procedura fotogrammetrica (Remondino *et al.*, 2011), i residui ottenuti sui punti di controllo (*GCPs*) risultavano pari a circa  $\pm 1$  mm (Tab. 1). Per avere un effettivo controllo sulla precisione e accuratezza del blocco fotogrammetrico sono stati valutati i risultati anche su alcuni *check points*: dopo aver estratto le coordinate stimate da *Photoscan*, queste sono state utilizzate per calcolare l'errore quadratico medio rispetto alle coordinate degli stessi punti ottenute dalla nuvola laser scanning.

Come si può notare dalla tabella riportata di seguito, i residui sui *check points* sono più alti rispetto a quelli sui punti di controllo, ma garantiscono comunque un'accuratezza del prodotto finale per la scala richiesta, ossia 1:50.

Ground Control Points (10)			
EQM X	EQM Y	EQM Z	Errore Totale
0.0006	0.0008	0.0008	0.0013
Check Points (6)			
EQM X	EQM Y	EQM Z	Errore Totale
0.0052	0.0047	0.0056	0.0090

Tabella 1. L'errore quadratico medio (EQM) in metri sui punti di controllo (*GCPs*) e sui *check points*

Nonostante ciò, si è deciso comunque di generare un'ortofoto con la dimensione del pixel più piccola (1 mm) solo al fine di ottenere una risoluzione migliore. Inoltre, le precisioni ottenute nell'orientamento del modello non sono da ritenersi assolute rispetto allo spazio oggetto definito dal rilievo topografico, ma relative alla congruenza tra la nuvola laser scanning e fotogrammetrica.

La principale criticità del rilievo fotogrammetrico ha riguardato i problemi dati dall'illuminazione ideata dal collezionista Mariano Fortuny (1871-1949): le luci orientate dal basso verso l'alto garantiscono un'ottima fruizione e visualizzazione dello spazio, ma causano delle zone sovraesposte in corrispondenza delle tele ad olio. Infatti, come si può notare dall'immagine (Fig. 8), la prima ortofoto presentava molti riflessi che non rendevano possibile una corretta visualizzazione delle tele.



Figura 8. Prima ortofoto realizzata del soffitto

Inizialmente, dunque, per ovviare a questo problema, sono state escluse dal processo le foto sovraesposte, ma il modello risultava incompleto, in quanto le immagini utilizzate non erano sufficienti a coprire l'intera superficie decorata.

Si è cercato di evitare il riflesso acquisendo delle foto delle tele con asse ottico inclinato e schema di presa radiale, ma l'ortofoto era caratterizzata da pixel di dimensioni maggiori (circa 3mm), a causa dell'inclinazione della camera e quindi della scala del fotogramma non omogenea.

Il problema dell'illuminazione è stato risolto con l'utilizzo di un filtro polarizzatore Hoya CIR-PL Ø58. Quest'ultimo, montato sull'obbiettivo della macchina fotografica, minimizza il passaggio delle onde luminose riflesse dalle superfici, polarizzando una parte della luce, escludendo cioè alcune frequenze dallo spettro visibile. Il filtro è composto da due lenti, una delle quali, ruotando, permette di orientare il piano di polarizzazione. Il filtro riduce l'intensità luminosa, aumenta i contrasti e satura i colori.

Tutte le foto delle tele sono dunque state acquisite nuovamente con l'applicazione del filtro polarizzatore e processate in *Photoscan* (Fig. 9). Tale filtro ha consentito di aumentare il numero di punti omologhi individuati nella fase di formazione del modello fotogrammetrico (Georgopoulos *et al.*, 2010; Guidi *et al.*, 2014).

Inoltre, in questo specifico caso, data la superficie liscia dell'oggetto rilevato e gli schemi di presa applicati, non sono state riscontrate particolari deformazioni dovute all'utilizzo del filtro.



Figura 9. Confronto tra l'ortofoto iniziale (a sinistra) e quella realizzata utilizzando il filtro polarizzatore (a destra)

L'ortofoto finale (Fig. 10) di tutto il soffitto è stata generata inserendo l'ortofoto delle tele ottenute col polarizzatore sulla cornice lignea realizzata nel precedente rilievo fotogrammetrico. Ciò è stato possibile in quanto le diverse tele sono state orientate all'interno dello stesso sistema di riferimento attraverso l'individuazione di alcuni punti della nuvola laser scanning; alla fine della procedura, sono stati ottenuti dei residui dello stesso ordine di grandezza del precedente modello. Anche in questo caso, si è deciso di impostare la grandezza del pixel dell'ortofoto pari a 1 mm solo al fine di ottenere una maggiore risoluzione finale.



Figura 10. L'ortofoto finale ottenuta al termine della procedura

In seguito è stato fatto un ulteriore test di acquisizione per ottenere un'immagine finale ad altissima risoluzione. Sono state effettuate numerose prese fotografiche di una porzione di una delle tele, aumentando progressivamente la lunghezza focale, a partire dall'utilizzo di un'ottica fissa con lunghezza focale 50 mm fino ad arrivare a un teleobiettivo Sigma con ottica zoom 70-300 mm. Sono state prodotte quattro immagini della stessa porzione di tela: confrontando i risultati delle elaborazioni, è possibile osservare come, aumentando la lunghezza focale, si riesca a ottenere un'immagine con un pixel progressivamente più piccolo (Tab. 2).

Lunghezza focale (mm)	Dimensione pixel (m)
50	0.001
70	0.0005
135	0.0003
200	0.0002

Tabella 2. Dimensione del pixel rispetto alla focale utilizzata

In un'ottica di musealizzazione dei beni storico-artistici, si è pensato che un prodotto di questo tipo potesse fornire un valore aggiunto alla Scuola, migliorandone la fruizione per un vasto pubblico di utenti. La procedura ha però interessato solamente la porzione di una tela, data l'elevata durata della fase di acquisizione e di elaborazione rispetto al rilievo fotogrammetrico precedentemente descritto. Nonostante gli ottimi risultati ottenuti dal test, questo procedimento non è stato adottato a causa dell'incompatibilità con i tempi di consegna e con i fini del lavoro.

#### 4. LE ELABORAZIONI FINALI

Le nuvole di punti laser scanning e fotogrammetriche sono state successivamente utilizzate per la restituzione degli elaborati grafici. Attraverso un plug-in di *Recap Pro* (Autodesk Recap) è possibile visualizzare le nuvole di punti direttamente in ambiente *AutoCAD* (Autodesk AutoCAD) per la creazione di elaborati tradizionali, come piante e alzati, o eventualmente per la generazione di modelli tridimensionali. Il software consente di impostare dei piani di sezione che, in questo caso, sono stati individuati nella mezzeria delle tele al fine di ottenere le informazioni necessarie sulla struttura di sostegno del soffitto e sulle sue eventuali deformazioni.

Gli elaborati grafici sono stati realizzati per la scala 1:50, in accordo con la richiesta della Scuola, che li utilizzerà come supporto metrico per i futuri interventi di restauro e manutenzione (Fig. 11). Sono state realizzate quattro sezioni trasversali, due sezioni longitudinali e la pianta rovescia alla quota di imposta del soffitto.

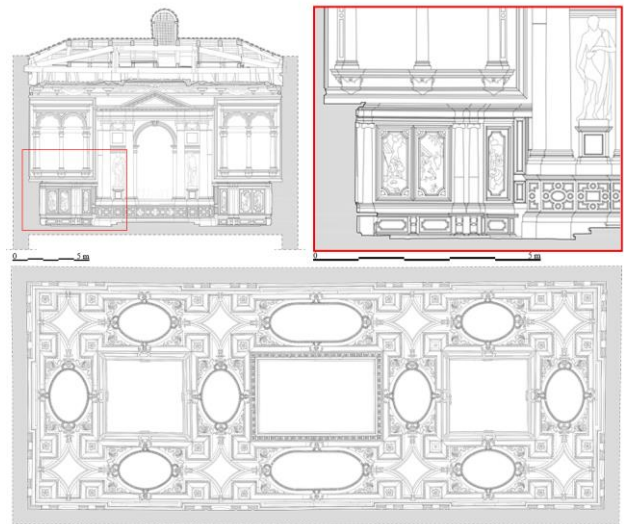


Figura 11. Alcune rappresentazioni digitali ottenute. In alto: una sezione trasversale con un dettaglio; sopra: la pianta rovescia

Quest'ultima è stata restituita con l'ausilio sia della nuvola laser scanning sia dell'ortofoto generata per via fotogrammetrica (Fig. 12): ciò è stato necessario soprattutto per la rappresentazione delle decorazioni, in quanto il dato fotogrammetrico, a differenza di quello laser, è continuo e garantisce, a parità di precisione, un grado di descrizione qualitativamente maggiore.



Figura 12. A sinistra: ortofoto laser scanning; in centro: ortofoto fotogrammetrica; a destra: restituzione vettoriale

Il lavoro ha permesso di documentare lo stato di fatto di tale architettura realizzando, per la prima volta, dei disegni al tratto degli ambienti rilevati con un dettaglio idoneo alla scala 1:50. I risultati ottenuti sono stati molto utili alla Scuola Grande per conoscere in modo approfondito le dimensioni della Sala al fine di progettare nel dettaglio i prossimi interventi di manutenzione. Inoltre, le scansioni laser scanning acquisite nella parte interstiziale tra il soffitto e il sottotetto, hanno consentito di rilevare una zona del tutto priva di documentazione, seppure estremamente importante in quanto vi prende posto il sistema di sostegno della cornice lignea e di ancoraggio delle tele del Tintoretto.

Infine, i rilievi, i disegni e l'ortofoto del soffitto verranno utilizzati dall'Università Ca' Foscari di Venezia come supporto per alcune analisi chimiche; infatti, il Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica sta effettuando indagini, da un lato, sulla qualità dell'aria della Sala e, dall'altro, sui colori originari utilizzati dal Tintoretto per dipingere le tele del soffitto. A questo proposito, i disegni serviranno per posizionare in modo corretto i filtri per la raccolta di particolato e polveri nella Sala Capitolare, mentre l'ortofoto realizzata per via fotogrammetrica verrà utilizzata come dato di partenza per lo studio dei valori radiometrici delle tele.

La grande mole di dati acquisiti e le elaborazioni realizzate consentono una rappresentazione dell'architettura di San Rocco

e delle tele del Tintoretto a una scala dettagliata. A tal proposito, una possibile applicazione futura potrebbe consistere nell'inserimento di monitor informativi, nell'ottica di un'implementazione dell'allestimento museale della Scuola, per consentire al visitatore una visualizzazione efficace e un'interazione maggiore con il capolavoro del Tintoretto (Fig. 13).



Figura 13. Esempio di una possibile applicazione museale dell'ortofoto generata per via fotogrammetrica

## 5. CONCLUSIONI

A oggi, il continuo sviluppo hardware e software permette di acquisire e produrre in tempi relativamente rapidi degli elaborati utili alla conoscenza completa di un oggetto. Bisogna però porre sempre particolare attenzione all'interpretazione delle rappresentazioni, analizzando con criticità i dati acquisiti, soprattutto per ciò che concerne l'accuratezza e la precisione ottenibili con le tecniche di rilievo utilizzate. Le analisi strutturali e conservative di un'architettura non possono prescindere dalla conoscenza della forma del caso studio: per tale motivo, il rilievo geometrico deve porsi all'inizio del percorso conoscitivo dell'oggetto e deve garantire l'accuratezza necessaria ai fini delle successive analisi. Il rilievo come fase imprescindibile per la conoscenza di un'opera può, per l'appunto, consentire la successiva conservazione di un bene culturale e la sua valorizzazione storica e materica.

Il lavoro presentato descrive la metodologia applicata per la conoscenza geometrica del soffitto della Scuola Grande di San Rocco. Come abbiamo visto, le architetture storiche presentano spesso delle problematiche legate alla complessità geometrica che le contraddistinguono; per questo motivo, le operazioni di rilievo devono essere adattate di volta in volta per rispondere alle necessità richieste e risolvere le criticità che la fabbrica in analisi impone. In questo caso specifico, l'aiuto di un filtro polarizzatore ha consentito di migliorare notevolmente la resa qualitativa dei prodotti finali e l'apertura dei riquadri nella cornice lignea ha permesso di velocizzare notevolmente l'acquisizione topografica.

Le nuvole di punti laser scanning, assieme a quelle fotogrammetriche, costituiscono, inoltre, una banca dati fondamentale per studiare lo stato di fatto della struttura: un possibile sviluppo futuro della ricerca consisterà nell'implementazione dei dati all'interno di un sistema HBIM, consentendo ai restauratori di ottenere un database tridimensionale delle informazioni catalogate per analizzare e progettare gli interventi futuri di manutenzione.

Per quanto riguarda invece lo sviluppo dell'aspetto museale della Scuola, due future implementazioni di questo lavoro riguarderanno, da un lato, la creazione di immagini ad altissima risoluzione, come descritto nel paragrafo precedente e, successivamente, la realizzazione di applicazioni di realtà

virtuale e immersiva per consentire ai visitatori una fruizione e una visualizzazione diversa e ravvicinata dell'opera del pittore cinquecentesco.

## BIBLIOGRAFIA

Apollonia L., Salonia P., 2010. Rilievo architettonico propedeutico al restauro della Cappella di Saint-Maxime a Challand-Saint-Victor. *Bollettino della Soprintendenza BB.CC.AA. della Regione Autonoma Valle d'Aosta*, vol. 6, pp. 262-272.

Armetta V., Giordano A., Lo Brutto M., Tumminello A., 2009. Tecniche fotogrammetriche digitali per la conservazione e il restauro di apparati decorativi. *Scienza e patrimonio culturale nel mediterraneo. Diagnostica e conservazione: esperienze e proposte per una carta del rischio*. I Quaderni di Palazzo Montalbo, n.15.

Balletti C., Guerra F., 2015. The survey of cultural heritage: a long story. *Rendiconti Lincei*, vol. 26, n. 1. <https://doi.org/10.1007/s12210-015-0411-8>

Balletti C., Berto M., Gottardi C., Guerra F., 2014. 3D technologies for the digital documentation of an ancient wooden structure. *IJHDE - Special Issue for the CIPA 2013 best paper award*, 3(1), pp. 19-32.

Balletti C., Berto M., Gottardi C., Guerra F., 2013. Ancient structures and new technologies: survey and digital representation of the wooden dome of SS. Giovanni e Paolo in Venice. *ISPRS Annals*, vol. II-5/W1, pp. 25-30.

Balletti C., Guerra F., Gerbaudi F., 2003. The survey of the wooden structure of the roof of Palazzo Ducale in Venice. *ISPRS Archives*, vol. XXXIV-5/W12, pp. 49-53.

Bitelli G., 2002. Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali. *VI Conferenza Nazionale ASITA*, IX-XXIV, Perugia, Italia.

Bolognesi C., Garagnani S., 2018. From a point cloud survey to a mass 3D modelling: renaissance HBIM in Poggio a Caiano. *ISPRS Archives*, vol. XLII-2, pp. 117-123. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-117-2018>

Borgogno Mondino E., Grua M., Lingua A., Giulio Toniolo F., 2005. Tecniche innovative per il rilievo multispettrale di affreschi murali. *IX Conferenza Nazionale ASITA*, Catania, Italia, pp. 445-450.

Calantropio A., Patruccio G., Sammartano G., Teppati Losè L., 2018. Low-cost sensors for rapid mapping of cultural heritage: first tests using a COTS Steadicamera. *Applied Geomatics*, vol. 10, n. 1, pp. 31-34. <https://doi.org/10.1007/s12518-017-0199-6>

Chiabrando F., Lingua A., Noardo F., Spano A., 2014. 3D modelling of trompe l'oeil decorated vaults using dense matching techniques. *ISPRS Annals*, vol. II-5, pp. 97-104. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-97-2014>

Georgopoulos A., Ioannidis Ch., Valanis A., 2010. Assessing the performance of a structured light scanner. *ISPRS Archives*, vol. XXXVIII-5, pp. 250-255.

- Guidarelli G., 2002. Una gioiata legata in piombo: la fabbrica della Scuola Grande di San Rocco in Venezia, 1517-1560. *Quaderni della Scuola Grande Arciconfraternita di San Rocco*, n. 8.
- Guidi G., Gonizzi S., Micoli L. L., 2014. Image pre-processing for optimizing automated photogrammetry performances. *ISPRS Annals*, vol. II-5, pp. 145-152. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-145-2014>
- Howard D., 1999. La Scuola grande della Misericordia di Venezia. *La Scuola grande della Misericordia di Venezia. Storia e progetto*, a cura di Fabbri G., Milano, Skira Editore.
- Kadobayashi R., Kochi N., Otani H., Furukawa R., 2004. Comparison and Evaluation of Laser Scanning and Photogrammetry and Their Combined Use for Digital Recording of Cultural Heritage. *ISPRS Archives*, vol. XXXV (B5), pp. 401-407.
- Kwiatk K., Tokarczyk R., 2015. Immersive photogrammetry in 3D modelling. *Geomatics and Environmental Engineering*, vol. 9, n. 2, pp. 51-62. <https://doi.org/10.7494/geom.2015.9.2.51>
- Murtiyoso A. Grussenmeyer P., 2018. Comparison and assessment of 3D registration and georeferencing approaches of point clouds in the case of exterior and interior heritage building recording. *ISPRS Archives*, vol. XLII-2, pp. 745-751. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-745-2018>
- Nocerino E., Rieke-Zapp D. H., Trinkl E., Rosenbauer R., Farella E. M., Morabito D., Remondino F., 2018. Mapping VIS and UVL imagery on 3D geometry for non-invasive, non-contact analysis of a vase. *ISPRS Archives*, vol. XLII-2, pp. 773-780. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-773-2018>
- Pullan B., 1982. Le scuole grandi, l'assistenza e le leggi sui poveri. *La politica sociale della Repubblica di Venezia, 1500-1620*, vol. 1, Roma, Il veltro.
- Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D., 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives. *ISPRS Archives*, 38(1/C22), pp. 25-31.
- Romanelli G., 1994. *Tintoretto: la Scuola Grande di San Rocco*. Milano, Electa.
- Sansovino, F., 1581. Delle Fraterne o Scuole Grandi. *Venetia città nobilissima et singolare*, vol. VII, Venezia.
- Scandurra S., Pulcrano M., Cirillo V., Campi M., di Luggo A., Zerlenga O., 2018. Integrated survey procedures for the virtual reading and fruition of historical buildings. *ISPRS Archives*, vol. XLII-2, pp. 1037-1044. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-1037-2018>
- Soravia G., 1824. La Chiesa e la Scuola Grande di San Rocco. *Le Chiese di Venezia illustrate e descritte*, vol. 3, Venezia.
- Tonon F., 1999. La Scuola Grande di San Rocco nel Cinquecento attraverso i documenti delle sue Mariegole. *Quaderni della Scuola Grande Arciconfraternita di San Rocco*, n. 6, Venezia, Grafiche Veneziane.
- Tonon F., 1998. Scuola dei Battuti di San Rocco. Documenti sulle origini e illustrazione dei Capitoli delle Mariegole. *Quaderni della Scuola Grande Arciconfraternita di San Rocco*, Venezia, Grafiche Veneziane.
- Tucci G., Bonora V., Fiorini L., Conti A., 2016. The Florence Baptistery: 3-D Survey as a Knowledge Tool for Historical and Structural Investigations. *ISPRS Archives*, pp. 977-984. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-977-2016>
- Webb E. K., Robson S., MacDonald L., Garside D., Evans R., 2018. Spectral and 3D cultural heritage documentation using a modified camera. *ISPRS Archives*, vol. XLII-2, pp. 1183-1190. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-1183-2018>
- Agisoft Photoscan:  
<http://www.agisoft.com>
- Autodesk AutoCAD:  
<https://www.autodesk.it/products/autocad/overview>
- Autodesk Recap:  
<https://www.autodesk.com/products/recap/overview>
- CAM2 Faro Focus 3D:  
<https://www.faro.com/it-it/prodotti/costruzione-bim-cim/cam2-focus>
- CAM2 Scene:  
<https://www.faro.com/it-it/prodotti/design-del-prodotto/faro-scene>
- MicroSurvey StarNet:  
<http://www.microsurvey.com/products/starnet/>