

**Il rilievo degli apparati decorativi.
Metodologie e questioni emergenti**

Francesco Bergamo



L'attività di ricerca in oggetto era inserita nel contesto del PRIN 2010-2011 "Prospettive Architettoniche: conservazione digitale, divulgazione e studio", per il quale il gruppo di ricerca coordinato da Agostino De Rosa presso l'Università Iuav di Venezia si era impegnato, specie nelle fasi iniziali, a mettere a punto un protocollo metodologico per il rilievo ad alta risoluzione di apparati decorativi, e specialmente di dipinti e affreschi, supportato da un repertorio di casi studio tali da esplicitare la maggior parte delle configurazioni e delle problematiche che lo studioso può incontrare in quest'ambito.

In una precedente edizione dei *Quaderni della ricerca* del Dipartimento di Culture del Progetto dell'Università Iuav di Venezia¹, chi scrive aveva già introdotto i due principali "laboratori" su cui si era trovato a lavorare: le prospettive architettoniche dipinte nel complesso conventuale della SS. Trinità dei Monti a Roma² e nelle Ville Venete della Riviera del Brenta in provincia di Venezia³. I rilievi eseguiti avevano tuttavia interessato anche altri casi, quali per esempio il grande soffitto dipinto da Gian Antonio Fumiani nella chiesa di San Pantalon a Venezia, studiato da Massimiliano Ciammaichella, e il Salone da ballo di Palazzo Labia affrescato da Giambattista Tiepolo, analizzato da Malvina Borgherini ed Emanuele Garbin.

Un *workflow* per il rilievo e l'elaborazione dei dati che possa produrre cloni digitali tridimensionali delle superfici interessate, mappati con *texture* ad alta risoluzione, consente agli studiosi di ottenere proiezioni parallele o centrali che sarebbero altrimenti indisponibili, di valutare accuratamente le configurazioni spaziali e di esplorare dettagli minutissimi, rivelando tracce altrimenti invisibili ad occhio nudo. La metodologia proposta è stata sviluppata soprattutto per soddisfare le esigenze dello studioso dei dipinti e delle superfici affrescate di qualsiasi dimensione, sia piane che voltate o irregolari, senza dover ricorrere a pratiche integrate più costose e non sempre più accurate.

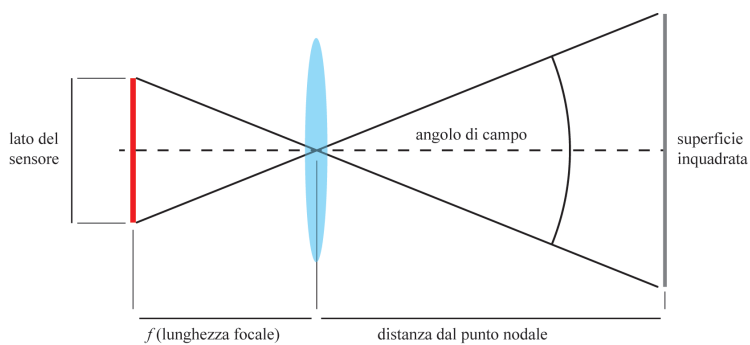
L'hardware impiegato si compone di una fotocamera digitale *full frame* con un set di obiettivi di diverse focali, un kit per l'illuminazione con lampade flash e softbox per diffonderne uniformemente la luce, e una testa motorizzata panoramica. Se si escludono gli strumenti digi-

tali CAD e per la *retopology* impiegati nelle fasi successive alle prime elaborazioni dei dati, le due classi di software più utilizzati per l'elaborazione sono rispettivamente: quella dei programmi per il *multi-stereo matching*, e quella per lo *stitching* e le operazioni di proiezione piana della fotografia sferica.

Dopo aver effettuato alcuni test e aver consultato la letteratura scientifica disponibile⁴, per la prima classe la scelta è ricaduta alcuni anni fa su Agisoft PhotoScan Pro, il software commerciale leader del settore grazie alla sua relativa semplicità d'uso, nonostante risultati accurati richiedano una conoscenza approfondita degli algoritmi sottesi e dei parametri che l'utente deve impostare in ogni fase. Il riconoscimento dei punti omologhi nelle diverse fotografie si basa sulla *computer vision*, il calcolo della posizione e dei piani delle fotografie implica la soluzione dei sistemi di equazioni propri della fotogrammetria, la calibrazione del sistema composto da fotocamera e obiettivo sfrutta le leggi dell'ottica, e i parametri per l'elaborazione della nuvola di punti, della *mesh* e della *texture* fanno riferimento a nozioni della rappresentazione digitale. Ad oggi, il software più utilizzato allo stesso scopo da chi scrive è 3DF Zephyr Aerial, che richiede più esperienza ma nelle ultime versioni è più stabile, accurato⁵ e versatile, offrendo la possibilità di registrare nuvole di punti da laser scanner con quelle generate dalle campagne fotogrammetriche.

I software più utilizzati per l'unione delle fotografie acquisite tramite la testa panoramica motorizzata e per la proiezione piana delle fotografie sferiche ad altissima risoluzione sono PTGui e Kolor Autopano, sia per la gestione dell'accuratezza dello *stitching* che per le possibilità di controllo e l'agilità non soltanto nelle fasi di allineamento delle immagini, ma anche e soprattutto nell'individuazione dei piani su cui proiettare le foto sferiche.

A tali classi di software corrispondono due approcci che insieme vanno a comporre una procedura coerente e in grado di soddisfare i requisiti di un rilievo accurato per buona parte degli apparati decorativi nell'architettura. Per entrambi la tecnica fotografica è indispensabile: ogni scatto deve contenere la maggiore quantità possibile di informazioni, che devono inoltre essere coerenti con quelle degli altri fotogrammi appartenenti allo stesso set. È dunque fondamentale conoscere a fondo l'hardware e il software del sistema composto da fotocamera digitale, lenti ed eventuali luci per controllare alcuni parametri che



Fase del rilievo della barchessa est di Villa Venier Contarini a Mira con le finestre oscurate e in evidenza l'hardware impiegato, 2015.

Foto di A. Calandriello

Illustrazione delle relazioni tra dimensioni del sensore (in pixel), lunghezza focale, angolo di campo, distanza tra superficie inquadrata e punto nodale

vanno tenuti in considerazione e verificati durante il rilievo: risoluzione minima, nitidezza e coerenza cromo-luministica.

Si parla qui di “risoluzione minima” poiché in un fotogramma si può stabilire il numero di pixel attraverso il quale è descritta una porzione di superficie, o la lunghezza di un segmento o di una curva su di essa. Nella maggior parte dei casi l’asse ottico non è ortogonale ad ogni porzione della superficie, quindi le aree più lontane saranno rappresentate da una densità in pixel per unità di superficie, o di lunghezza, via via inferiore. Per esempio, una risoluzione minima di 4 pixel/mml (ovvero di 16 pixel/mm²) è garantita soltanto se la *texture*, generata tramite fotogrammetria digitale e/o foto sferica, soddisfa tale condizione: per la fotogrammetria digitale, ogni millimetro lineare deve essere rappresentato da almeno 4 pixel in almeno due fotogrammi; nella fotografia sferica, si calcola la risoluzione minima tenendo conto della posizione del punto nodale dell’obiettivo, che coincide con il centro della sferica. Si risolve dunque l’equazione che mette in relazione la dimensione (in pixel) del sensore – considerandola equivalente a quella dell’immagine fotografica – con quella in millimetri di segmenti significativi sulle superfici inquadrare dall’angolo di campo. Sono disponibili applicazioni per dispositivi mobili per determinare l’angolo di campo e le dimensioni dell’area inquadrata inserendo come input il modello della fotocamera, la lunghezza focale dell’obiettivo e la distanza della superficie da fotografare. La scelta del parametro della risoluzione minima è fondamentale e può richiedere test e simulazioni preventive: al suo aumentare emergono sempre più dettagli ma, a parità di risoluzione minima, superfici più estese richiedono più immagini e dunque più dati, con il rischio che questi diventino ingestibili.

A parità di risoluzione, un sottoinsieme di parametri che influenzano la quantità e la qualità delle informazioni contenute in un certo numero di pixel è quello che afferisce alla nitidezza dell’immagine, o di quelle sue parti che riguardano l’oggetto del rilievo. Alla nitidezza è necessario prestare particolare attenzione dal momento che deriva da una combinazione di fattori che in parte dipendono dalle condizioni del contesto, e che non possono essere sempre misurati. Per esempio, essa può essere compromessa dalla costruzione del sistema di lenti dell’obiettivo, anche in funzione dell’apertura del diaframma la cui scelta, a sua volta, dev’essere valutata in base all’impostazione del valore degli ISO e della velocità dell’otturatore, che quando rimane aperto a lungo

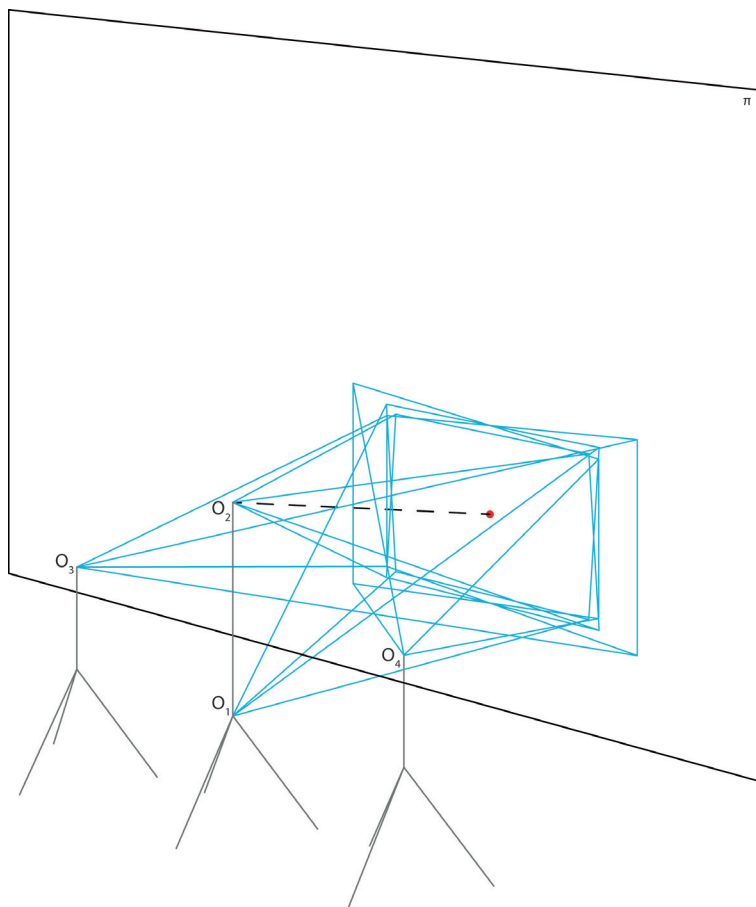


Illustrazione del metodo impiegato per il rilievo fotogrammetrico digitale

può registrare vibrazioni. Un fattore generalmente più controllabile riguarda la messa a fuoco dell'area interessata, agevolata dalla precisione dei sistemi autofocus delle fotocamere digitali contemporanee, ma dipende anche dalla profondità di campo che varia in funzione della lunghezza focale e dell'apertura del diaframma. Nel caso di singoli fotogrammi scorciati e per le foto sferiche è dunque necessario prestare attenzione alla distanza minima e a quella massima tra le superfici da fotografare e il punto nodale. L'apertura del diaframma modifica principalmente la quantità di luce che raggiunge il sensore in funzione del tempo di esposizione: in condizioni di illuminazione naturale, artificiale o ibrida è pressoché impossibile che un ambiente sia illuminato in modo perfettamente uniforme, e le situazioni di illuminazione mista sono ulteriormente complicate dalle diverse temperature di colore di diverse sorgenti. In questi casi può essere necessario, sia in vista del *dense matching* sia per la fotografia sferica, scattare più fotografie nella stessa posizione e con la stessa inquadratura ma con valori diversi del tempo di esposizione tramite la funzione di *bracketing* di cui dispongono quasi tutte le reflex digitali, sebbene questo implichi un notevole incremento dei dati da elaborare. Se si rende necessario portare la temperatura di colore a un valore il più possibile "oggettivo", si può collocare un riferimento cromatico, come per esempio un *color checker*, nella porzione desiderata della scena al momento del rilievo. Se la configurazione e le dimensioni dell'ambiente lo consentono è possibile eseguire il rilievo impiegando solamente luci artificiali, continue o a flash. Lavorare con i flash per porzioni implica restituire una condizione luministica innaturale e impossibile al tempo in cui gli affreschi furono realizzati, ma che consente di comparare i rapporti cromatici tra le diverse parti, anche per valutare le scelte dei pittori o le condizioni dell'affresco in dipendenza dalla luce solare proveniente da porte e finestre a diverse ore del giorno e in diverse stagioni. L'approccio "fotogrammetrico" era stato sviluppato per l'elaborazione tramite PhotoScan Pro, tuttavia la tecnica di ripresa si è rivelata adeguata anche per altri software quali, per esempio, MicMac e il già citato Zephyr. Si è constatato che le prescrizioni del manuale utente di PhotoScan per quanto riguarda il rilievo di spazi interni provocavano risultati insufficienti, così si è deciso di fare riferimento ai fondamenti della fotomodellazione⁶. Poiché il software determina i centri e le direzioni di presa accoppiando punti omologhi, identificati nelle diverse

fotografie attraverso algoritmi di *computer vision*, è necessario che ciascun punto dell'oggetto del rilievo sia visibile in almeno due fotogrammi. Tuttavia, i risultati migliori si sono ottenuti mirando all'intorno dello stesso punto da quattro o cinque posizioni diverse: per esempio rispetto a quella "frontale", con l'asse ottico perpendicolare alla superficie nel caso di un muro verticale, la stessa porzione viene fotografata anche puntando da circa un metro a sinistra, uno a destra, uno in alto e uno in basso. Da quanto affermato a proposito della risoluzione in pixel/mm si evince che l'obiettivo e la minima distanza dalla superficie per ogni scatto variano in funzione l'uno dell'altra, e devono pertanto essere determinati anche a seconda delle possibilità di spostarsi agevolmente nell'ambiente e della profondità di campo in relazione all'apertura del diaframma.

Tramite tale approccio è possibile ottenere un modello numerico testurato attraverso un *workflow* che si può riassumere nelle seguenti fasi: selezione e importazione delle fotografie; calibrazione del sistema composto da fotocamera e ottica e importazione dei parametri così ottenuti, per una maggiore accuratezza del risultato; eventuale selezione in ogni fotogramma delle aree da escludere dal calcolo; eventuale attribuzione di coordinate cartesiane ad almeno tre punti in diversi fotogrammi; determinazione dei centri e delle direzioni di presa dei fotogrammi (fase di allineamento) che genera una *sparse cloud*, ovvero la nuvola dei soli punti omologhi identificati in fase di allineamento; costruzione di una *dense cloud*, ovvero di una nuvola di punti più densa, in funzione dei parametri prescelti; generazione della *mesh* a partire dalla *dense cloud*; produzione della *texture*, dopo aver scelto il tipo di mappatura più indicato. Infine, è possibile esportare il modello in diversi formati di interscambio, nonché generare direttamente rappresentazioni di qualità fotografica in proiezione centrale o parallela. La selezione "manuale" delle aree dei fotogrammi da escludere è funzionale ad eliminare da ogni processo di calcolo tutti i punti corrispondenti ad elementi che possano causare proliferazione di rumore: gli elementi di disturbo più comuni possono essere identificati nella vegetazione, nella presenza di arredi ingombranti e dalla configurazione complessa, in superfici molto uniformi dove l'algoritmo di accoppiamento dei punti fatica a identificarne⁷ e in sostanze riflettenti o diottriche.

Emerge a questo punto la necessità di portare un modello digitale adimensionale in scala e di orientarlo correttamente. Per fare ciò gli



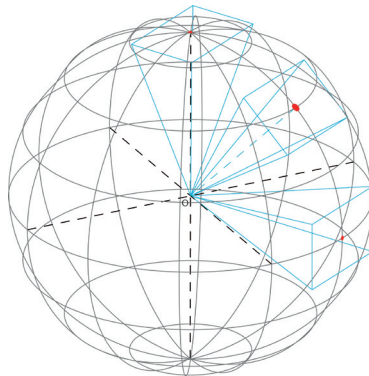
Ortofoto del modello della scala di Villa Valier a Mira, 2015.
Elaborazione digitale di F. Bergamo

operatori possono misurare la distanza tra punti facilmente identificabili nel modello tramite strumenti quali una cordella metrica o un disto laser, oppure inserire nella scena artefatti di dimensioni note prestando attenzione a che essi non vengano spostati durante la campagna, e che compaiano in un numero di fotografie tale da essere integrati nel modello digitale. Disponendo di una stazione totale o un laser scanner, si possono associare le coordinate cartesiane di alcuni punti notevoli agli stessi punti identificabili in due o più fotogrammi già prima dell'allineamento automatico delle immagini.

Questo primo approccio si potrebbe considerare bastevole allo scopo di produrre modelli e rappresentazioni atti alla documentazione dello stato di fatto, ma si è ritenuto conveniente associarvi un secondo tipo di rilievo basato sulla fotografia sferica: all'hardware impiegato per la fotogrammetria digitale basta aggiungere una testa panoramica motorizzata, con la posizione della fotocamera calibrata in modo tale che il punto nodale dell'obiettivo corrisponda al centro di rotazione della testa⁸. Nonostante le foto sferiche non siano generalmente adeguate per il *dense matching*, esse costituiscono un prezioso riferimento per la loro risoluzione generalmente più elevata, così possono essere adoperate ad esempio per migliorare la *texture*. Inoltre, per superfici approssimabili a piane si possono ricavare proiezioni prospettiche piane che, come nel caso di una fotografia con l'asse ottico ortogonale al piano interessato, servono ai fini dello studio alla stregua di ortofoto ad altissima risoluzione, prive del rumore dovuto a ingombri o a superfici omogenee o riflettenti tipico della fotogrammetria digitale.

Una sferica completa con un obiettivo di focale 50 mm può produrre oltre 10 Gb di dati, da moltiplicare per tre nel caso di impostazioni per HDR a tre diverse aperture di diaframma. Si deve inoltre considerare che, a parità di dimensione e di distanza, una porzione di sferica di un soffitto richiederà a una testa panoramica quale la GigaPan, che si muove per meridiani e paralleli, più tempo e più scatti rispetto a una parete verticale: se si pensa al centro di ogni fotogramma (di dimensioni costanti) come al punto di intersezione tra un meridiano e un parallelo, si evince che più l'asse ottico si allontana dall'equatore, più i dati diventano ridondanti: la maggior parte dei punti sull'equatore si ritrova in un solo fotogramma, mentre quelli negli intorni dello zenit e del nadir si ripetono per ogni meridiano.

Durante le fasi iniziali di test sull'hardware e sul software e di messa



Fotocamera reflex digitale e obiettivo, montati sulla testa motorizzata GigaPan Epic Pro

Il sistema di meridiani e paralleli lungo i quali ruota la fotocamera montata sulla GigaPan Epic Pro

a punto dei due approcci si erano comparati i primi risultati, tra quelli ritenuti soddisfacenti, con rilievi effettuati tramite laser scanner: ciò aveva confermato l'accuratezza della procedura qui esposta, con uno scarto massimo di 5 mm rispetto alla scansione laser. Sebbene le metodologie e le procedure finora discusse siano state così affinate per il rilievo delle prospettive architettoniche affrescate e dipinte, si può far notare come l'approccio fotogrammetrico possa essere esteso alla maggior parte degli spazi architettonici, eventualmente impiegando dei *marker* per le porzioni di superfici ove il software non sarebbe in grado di individuare punti omologhi nei diversi fotogrammi. La fotografia sferica invece risulta di particolare interesse per le superfici piane, anche se molto estese dal momento che esse possono essere suddivise in più parti da unire in seguito alla rettificazione tramite l'ausilio di piani e di punti di controllo (operazione che può tuttavia risultare lunga e complessa).

L'originalità dei singoli approcci è qui limitata alle specificità dell'impiego in ambienti affrescati, ma è opportuno ribadire come, date una dotazione hardware e software dai costi relativamente ridotti, sia stato possibile implementare ciascuno dei due approcci attraverso l'integrazione con l'altro, per ottimizzare tanto l'accuratezza quanto i tempi del rilievo.

1. A. Bortot (a cura di), *Rappresentare i confini. Percorsi di ricerca tra scienza e arte*, Mimesis, Milano-Udine 2016.

2. Cfr. F. Bergamo, *Sulle Prospettive architettoniche: il caso studio degli apparati decorativi presso il convento della SS. Trinità dei Monti (Roma)*, ivi, pp. 38-51. È in corso di pubblicazione un volume a cura di Agostino De Rosa, che raccoglie ricerche puntuali sui più interessanti casi prospettici dell'urbe.

3. F. Bergamo, *Catalogazione, rilievo restituzione e comunicazione digitale delle prospettive architettoniche dipinte. Il caso veneto*, ivi, pp. 138-147. La ricerca è stata condotta sotto la supervisione di Massimiliano Ciammaichella e gli esiti, che hanno coinvolto buona parte dell'unità veneziana, sono pubblicati in F. Bergamo, M. Ciammaichella (a cura di), *Prospettive architettoniche dipinte nelle Ville Venete della Riviera del Brenta in provincia di Venezia / Architectural Perspective in the Venetian Villas along the Riviera del Brenta in the Province of Venice*, Aracne, Roma 2016. Per una trattazione più esaustiva delle metodologie qui esposte si rimanda in particolare a F. Bergamo, *Rilievo fotografico e rappresentazione digitale delle prospettive architettoniche dipinte. Metodologie di acquisizione per l'alta risoluzione e il multi-stereo matching*, ivi, pp. 52-73.

4. Negli ultimi cinque anni essa ha visto una notevole produzione di testi, in buona parte di autori di origine

italiana. Cfr., per es. molti contributi in S. Brusaporci (a cura di), *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling and Representation*, 2 voll., IGI Global, Hershey 2015.

5. Comparando i risultati delle elaborazioni di data set identici in PhotoScan con gli stessi settaggi, si è notato che computer diversi restituiscono risultati diversi (per esempio nel numero di punti delle sparse e dense cloud). Questo è dovuto ad alcuni sotto-processi stocastici, specie in fase di allineamento, ma altri software (come Zephyr) si sono rivelati più attendibili.

6. Cfr. per es. L. De Luca, *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flaccovio, Palermo 2011. Si ringrazia in particolare Cristian Boscaro per il contributo nell'affinare la tecnica di determinazione dei centri di presa.

7. Si tratta di un problema che riguarda, per esempio, superfici intonacate lisce dipinte di bianco, ma che generalmente non si presenta nei casi di pitture murarie o di affreschi in quanto molto "ricchi di texture".

8. Le più comuni teste panoramiche, come la GigaPan, si muovono per meridiani e paralleli secondo angoli che rispondono a un altro tipo di calibrazione: quella che afferisce all'angolo di campo dell'ottica e che si effettua allineando all'orizzonte prima il lato superiore e poi quello inferiore dell'inquadratura. Altre teste motorizzate più sofisticate, quali le Clauss Rodeon e il sistema Spheron VR, presentano invece sistemi di gestione ottimizzati e più avanzati.