

# **IL CAMPANILE DI GIOTTO. SCANSIONI LASER E ORTOFOTO DI PRECISIONE PER IL CONTROLLO E LA MANUTENZIONE DEL RIVESTIMENTO LAPIDEO DELLE FACCIATE**

Valentina BONORA (\*), Fulvio RINAUDO(\*), Grazia TUCCI (\*\*)

(\* Politecnico di Torino, fulvio.rinaudo@polito.it, valentina.bonora@polito.it

(\*\*) Università degli Studi di Firenze, grazia.tucci@unifi.it

## **Riassunto**

Le ortofoto a grande scala trovano diffuse applicazioni nella documentazione dei beni culturali: la rappresentazione del contenuto fotografico in proiezione ortogonale, rispetto ad un piano predefinito, associa infatti la possibilità di desumere informazioni metricamente valide a quella di registrare i materiali che costituiscono i manufatti ed il loro stato di conservazione.

Il presente contributo si propone di illustrare diversi sistemi di produzione di ortofoto, assumendo quale caso studio il campanile della chiesa di Santa Maria del Fiore a Firenze (Campanile di Giotto).

Con la realizzazione dell'ortofoto di precisione del Campanile ci si propone di fornire un valido supporto per le attività di manutenzione del complesso monumentale svolte a cura dell'Ufficio tecnico dell'Opera di Santa Maria del Fiore di Firenze, diretto da Paolo Bianchini.

Del lavoro in corso si presentano attualmente i risultati delle campagne di acquisizione dei dati primari (immagini e punti di appoggio) che costituiranno il materiale di partenza per la sperimentazione delle diverse tecniche di produzione di ortofoto, i cui esiti verranno pubblicati nei prossimi mesi.

## **Abstract**

Large-scale orthophotos are widely used in cultural heritage documentation. The metric characteristics of the orthogonal projections are jointed to photographic content: in this way both metric information and conservation state of the material could be evaluated on the same representation.

The paper would show various systems of orthophoto production, assuming as reference case study the Campanile di Giotto, in Florence. It presents acquired data (photos and control points) that will support some tests related to digital orthophotos productions. Results will be published soon.

## **Introduzione**

Da alcuni anni le tecniche di acquisizione e di elaborazione di immagini digitali hanno consentito di affrontare le problematiche della produzione di ortoproiezioni anche nelle complesse applicazioni del rilievo di oggetti architettonici. Questi oggetti, come noto, presentano, rispetto al più tradizionale campo di applicazione delle ortofoto del terreno naturale, diverse difficoltà legate alla presenza di forti discontinuità nella direzione della profondità che mettono in crisi i tradizionali approcci di questa tecnica. Per risolvere queste problematiche attualmente sono già disponibili alcune soluzioni, sia in ambito commerciale sia in ambito universitario.

Lo scopo del lavoro consiste nel comparare i vari metodi offerti dalla comunità scientifica, di valutarne pregi e difetti nelle applicazioni di rilievo di oggetti a morfologia complessa e di delineare possibili scenari per un ulteriore sviluppo delle tecniche di orto proiezione.

Lo studio verrà effettuato utilizzando come oggetto dei test il Campanile della Chiesa di Santa Maria del Fiore a Firenze. Con la realizzazione dell'ortofoto di precisione ci si propone di fornire un valido supporto per le attività di manutenzione del complesso monumentale svolte a cura dell'Ufficio tecnico dell'Opera di Santa Maria del Fiore di Firenze, diretto da Paolo Bianchini.

Gli elaborati prodotti saranno quindi utilizzati durante le future ricognizioni per la valutazione dello stato di conservazione del paramento lapideo e per la realizzazione di carte tematiche che, con la predisposizione di un'opportuna struttura di archiviazione dei dati, potranno costituire la base per un sistema informativo finalizzato alla progettazione degli interventi.

Il presente lavoro costituisce un'introduzione allo studio che gli autori intendono sviluppare, e offre una disamina delle tecniche di ortoproiezione oggi disponibili e i risultati della campagna di acquisizione dei dati primari effettuata la scorsa estate.

### 1. Progetto fotogrammetrico

Per poter effettuare misure di controllo su future ortoproiezioni e per garantire la possibilità di riprendere ogni dettaglio della facciata del Campanile e ridurre quindi l'effetto degli inevitabili scorci prospettici di ogni fotogramma, si è deciso di effettuare una presa stereoscopica con ampi ricoprimenti.

Per la realizzazione del progetto fotogrammetrico è stata utilizzata una camera calibrata medio formato (Rollei 6008) con dorso digitale da 22 Mpixel (Phase One P 25, formato 4:3) e obiettivo Distagon da 40mm.

A causa della conformazione dell'oggetto del rilievo la presa è stata eseguita con un'unica strisciata ad andamento verticale e ricoprimento dell'80% tra fotogrammi adiacenti. Lo schema di presa è stato progettato per ottenere l'ortofoto dei prospetti rivolti verso la piazza alla scala 1:50. In funzione delle grandezze che caratterizzano la geometria della camera utilizzata (c: 40mm, dimensioni sensore: 48mm x 36mm) si è quindi progettato di realizzare le prese ad una distanza variabile tra i 16 m e i 18m dalle facciate e una base di presa variabile tra i 3m e i 4m in modo da contenere il rapporto "base di presa/distanza" intorno a valori mai inferiori a 1/5. Si sono ottenuti in questo modo fotogrammi con scala media prossima a 1:300 e dimensione del pixel sull'oggetto di circa 4mm.

La risoluzione appena indicata appare appropriata sia in relazione alle necessità interpretative di un'ortofoto alla scala 1:50, che alle corrispondenti precisioni prescritte. In merito al primo aspetto, infatti, si può considerare che (per il teorema del campionamento, secondo il quale la frequenza delle misurazioni deve essere doppia rispetto alla massima frequenza che si vuole considerare) per

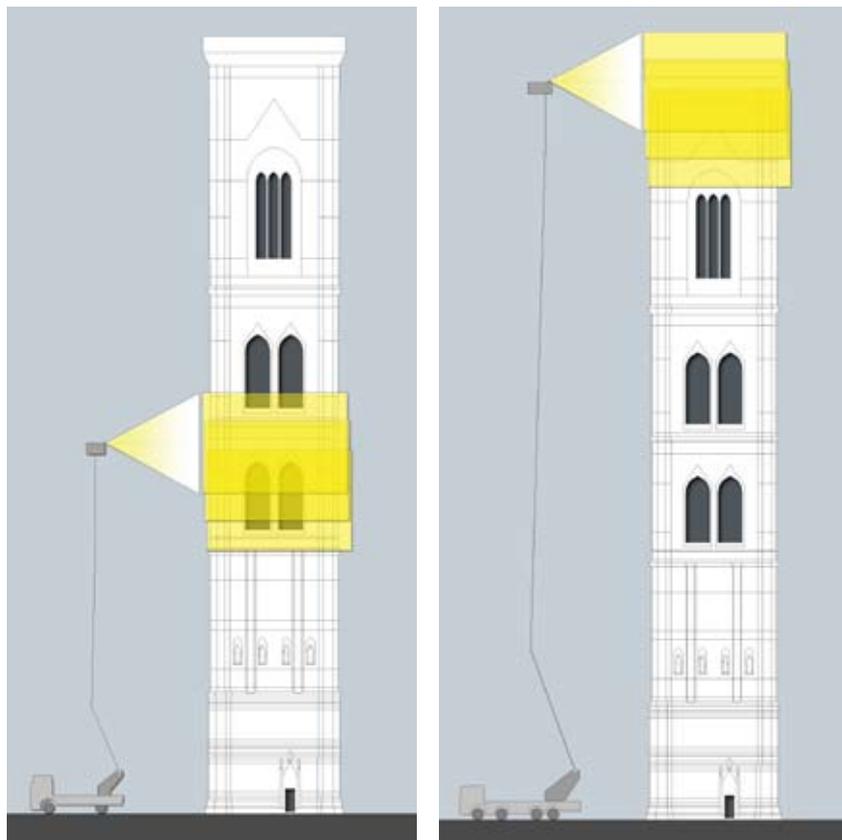


Figura 1 – Schema di presa: per la realizzazione dell'intera copertura è stato necessario utilizzare due diversi cestelli elevatori

Figura 2 - Realizzazione delle prese fotogrammetriche



apprezzare, su di una rappresentazione digitale, grandezze dell'ordine del centimetro, è necessario che tale rappresentazione sia costituita da pixel di dimensione non superiore a 5mm. Per il secondo aspetto, invece, si fa abitualmente riferimento alle precisioni di elaborati tradizionali alla scala equivalente, assumendo come valore rappresentativo quello derivato da un errore di graficismo di 0.3mm alla scala della rappresentazione (quindi 1.5cm per la scala 1:50).

Per la copertura del prospetto orientale del Campanile, a cui si riferiscono le elaborazioni descritte nel seguito, sono stati necessari 25 fotogrammi.

#### *Determinazione di punti di appoggio*

I punti di appoggio sono stati rilevati con metodo celerimetrico mediante l'utilizzo di una stazione totale con misura delle distanze senza prisma. I punti di appoggio non sono stati presegnalizzati ma individuati su particolari dell'apparato decorativo del campanile. Sono stati determinati 80 punti di coordinate note da utilizzare in parte come punti di appoggio e in parte come punti di controllo dell'intera operazione.

#### *Orientamento interno dei fotogrammi*

I parametri considerati nel calcolo dell'orientamento interno sono stati: distanza principale, coordinate del punto principale di auto collimazione, curva di distorsione radiale residua fornita secondo il modello di Brown.

#### *Orientamento esterno dei fotogrammi – misura automatica di punti naturali*

L'orientamento esterno di tutti i fotogrammi è stato calcolato contemporaneamente, compensando l'intera strisciata mediante un procedimento di triangolazione fotogrammetrica a stelle proiettive. Considerata la natura dell'oggetto (presenza di forti discontinuità nella direzione della coordinata Z fotogrammetrica e presenza di zone a radiometria omogenea) non è possibile pensare di utilizzare procedure completamente automatiche per l'individuazione dei punti di legame. Ogni punto di legame è stato quindi scelto in prima istanza dall'operatore e solo la collimazione fine è stata perfezionata con algoritmi di autocorrelazione. La stessa procedura è stata utilizzata per la collimazione di punti di appoggio. I residui massimi presentati al termine della compensazione della strisciata sono dell'ordine di grandezza del centimetro.



Figura 3 – Posizioni di acquisizione delle scansioni laser

## **2. Rilievo del DSM con tecniche LIDAR**

Considerata la morfologia del campanile il metodo attualmente più conveniente per la determinazione di un modello di superficie idoneo alle successive fasi di ortoproiezione consiste nell'acquisizione mediante strumenti LIDAR di nuvole di punti di densità e precisione sufficienti a descrivere la complessa morfologia della superficie di interesse.

E' stato utilizzato lo scanner LMS-Z420i (Riegl) che garantisce precisioni nella misura delle distanze dell'ordine di 0.5 cm e quindi precisioni presumibili sul posizionamento assoluto dei punti dell'ordine di 1 cm.

Le scansioni sono state realizzate da tre postazioni, tutte collocate al livello della strada e individuate per ottimizzare la copertura dei tre prospetti (si è infatti trascurato quello adiacente al Duomo), tenendo anche in considerazione la conformazione della piazza e gli spazi che è stato necessario mantenere liberi per la viabilità.

Le tre scansioni sono state allineate e referenziate in un unico sistema locale grazie a 25 target catarifrangenti omogeneamente distribuiti sui prospetti considerati. Tali segnali sono poi stati posizionati nel sistema di riferimento della rete di appoggio in modo da poter collegare efficacemente i sistemi di riferimento delle scansioni al sistema di riferimento utilizzato per l'orientamento della strisciata.

## **3. Sistemi per la generazione di ortofoto**

L'ortofoto unisce i vantaggi di una rappresentazione fotografica - su di essa è quindi possibile registrare materiali, tecnologie costruttive, stato di conservazione - a quelli di un rilievo metrico. Per l'ortoproiezione dei fotogrammi è indispensabile disporre di un modello geometrico dell'oggetto: alla scala territoriale si distingue solitamente tra il modello del suolo (DTM) e quello che considera anche tutti gli elementi naturali e gli edifici che si trovano su di esso (DSM). Diventa indispensabile considerare quest'ultimo per le applicazioni cartografiche a grande scala e in ambito urbano, realizzando un'ortofoto di precisione, integrando anche procedure multi-immagine. Per le applicazioni architettoniche è evidente che il modello di forma non può essere "depurato" dalle accidentalità della fabbrica ed è sempre necessario disporre di una dettagliata descrizione della consistenza geometrica, che consideri sporti, rientranze, cornici, ecc.

Il modello di forma può essere derivato da una restituzione vettoriale delle principali discontinuità oppure, come sempre più frequentemente accade, da scansioni laser. La possibilità di disporre di dettagliati modelli geometrici oltre ad una serie di fotogrammi orientati permette di produrre non solo ortofoto ma anche modelli texturizzati esplorabili in continuo. Diventano quindi sempre meno evidenti i confini tra applicazioni con contenuto metrico e altre finalizzate alla visualizzazione: la tendenza è quella di definire prodotti che rispondano efficacemente ad entrambe le esigenze.

In parallelo si deve considerare che i vari modelli di laser scanner integrano ormai da qualche tempo, con soluzioni tecniche differenti, sistemi fotografici. Questo consente di velocizzare le operazioni di rilievo in quanto modello geometrico e prese fotografiche sono realizzate quasi in contemporanea. Un ulteriore contenimento dei tempi necessari sul campo è raggiungibile se si può considerare noto non solo l'orientamento interno della camera, ma anche quello esterno (definito a priori con procedure di taratura e non a posteriori con misure topografiche).

Alcuni limiti dei sistemi integrati appena illustrati sono costituiti dalle diverse condizioni ambientali più favorevoli per la realizzazione di scansioni o di immagini fotografiche, relative sia all'illuminazione che alla geometria di presa.

Per quanto riguarda i software dedicati alle successive elaborazioni dei dati, si può distinguere tra:

- software fotogrammetrici, che consentono di gestire anche dati laser scanner; il problema è principalmente legato alla visualizzazione e gestione di grandi quantità di dati vettoriali.
- software per il controllo del laser scanner e l'elaborazione delle range map, che offrono anche la possibilità di gestire la proiezione di fotogrammi, mutuando algoritmi sia dalla fotogrammetria tradizionale che dalla computer vision, tradizionalmente più prossima al mondo della modellazione vettoriale 3D.

Per la realizzazione dei test in progetto sono stati individuati sia pacchetti commerciali (Z-Map Laser, Menci e RiScan Pro, Riegl) che software sviluppati in ambito accademico (Accortho, Politecnico di Torino).

Negli schemi seguenti è sintetizzato il funzionamento di un sistema fotogrammetrico e di uno principalmente dedicato alla elaborazione di dati vettoriali 3D.

Il sistema fotogrammetrico impone prioritariamente l'individuazione del piano di proiezione: l'ortofoto è quindi generata definendo, con le necessarie interpolazioni e tramite una sorta di "proiezione inversa" (prospettivizzazione), il valore radiometrico corrispondente ad ogni pixel di una matrice immagine predisposta, coincidente con tale piano. Anche l'informazione geometrica è strutturata secondo un'immagine raster (un DEM) nella quale il contenuto radiometrico rappresenta un attributo di elevazione.

La costruzione di un'ortofoto secondo un piano di proiezione differente richiede quindi l'elaborazione di un nuovo DEM (a partire, ovviamente, dagli stessi dati vettoriali) e quindi la riproiezione dei fotogrammi orientati.

La procedura implementata nel software di gestione dei dati LIDAR differisce in primo luogo perché considera implicito l'orientamento esterno dei fotogrammi scattati contestualmente alle scansioni. Inoltre, la tridimensionalità dell'informazione geometrica è conservata fino all'ultima fase ed è costituita da un modello triangolato: i fotogrammi sono infatti proiettati direttamente sul modello di superficie e solo successivamente è indicata la vista (ovviamente ortogonale) rispetto alla quale viene renderizzata l'ortofoto, secondo un approccio comune ad altri ambienti di modellazione tridimensionale.

Quando l'oggetto analizzato è una porzione di territorio, generalmente il punto di vista è posto all'infinito e la giacitura del quadro di proiezione è definita secondo l'orizzontale. Il caso del Campanile di Giotto è del tutto analogo, a meno della tradizionale trasformazione tra il sistema di riferimento topografico e quello fotogrammetrico adottato nel caso di rilievi di facciate. E' però frequente, nella documentazione a grandissima scala di spazi architettonici, l'esigenza di definire molteplici piani di proiezione per giungere ad un'esaustiva rappresentazione dello spazio analizzato, come accade,

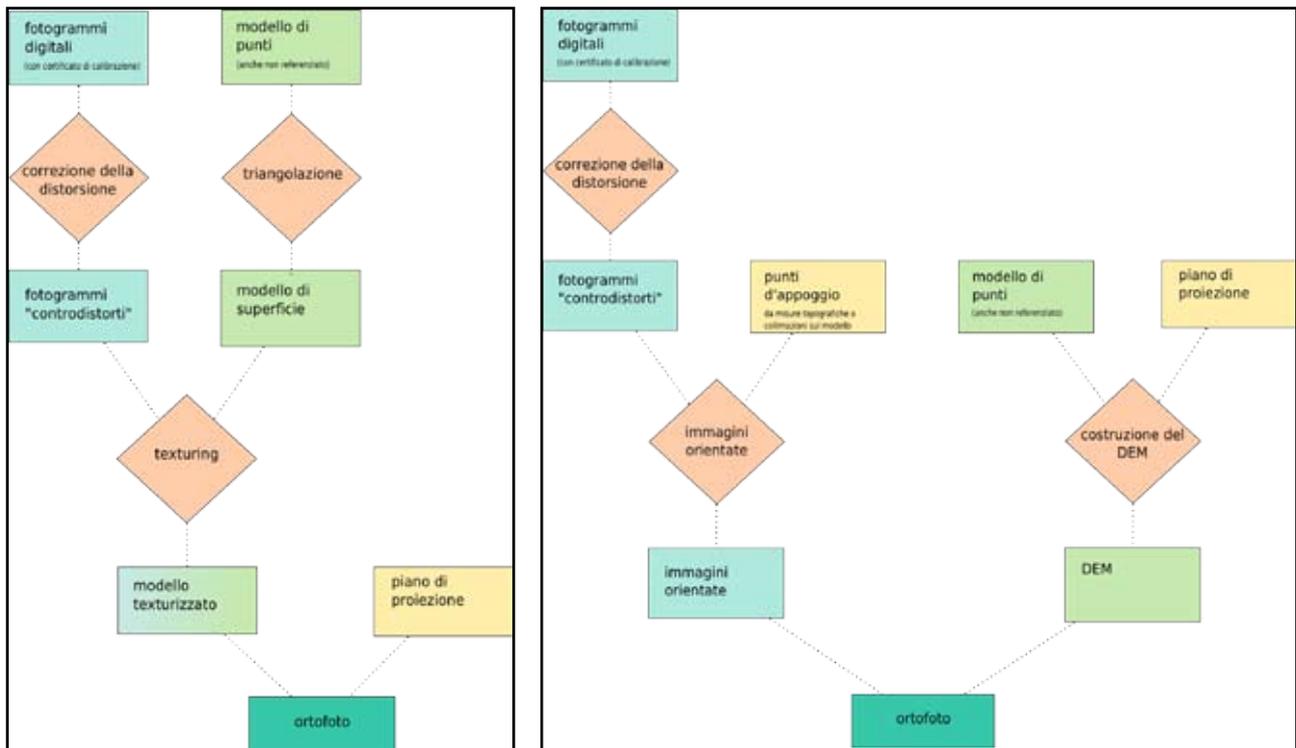


Figure 4,5 – Schema operativo per la formazione di ortofoto in un software fotogrammetrico e in un software principalmente dedicato all'elaborazione di dati LIDAR

per esempio, per la documentazione di un ambiente interno. Presumendo di disporre in ogni caso di una descrizione geometrica densa proveniente da scansioni 3D, con un software del primo tipo è necessario il calcolo di un DEM per ogni piano rispetto al quale si voglia generare un'ortofoto; con un software del secondo tipo, la generazione di un'ortofoto equivale alla definizione di una vista, ovviamente ortogonale, rispetto ad un modello di superficie texturizzato.

#### 4. Conclusioni e prospettive

Sono stati presentati i risultati delle recenti campagne di rilevamento tramite le quali sono stati acquisiti fotogrammi e scansioni 3D per la realizzazione di ortofoto digitali.

Il progetto, di cui si sono descritte le fasi di acquisizione dei dati primari, proseguirà con la realizzazione di ortofoto

di precisione mediante software commerciali e utilizzando la soluzione proposta dal Gruppo di Ricerca del Politecnico di Torino. Le ortofoto saranno quindi sottoposte a verifiche di precisione e di potenzialità descrittiva in modo da evidenziare la miglior procedura da seguire in questo particolare ambito applicativo ed eventuali miglioramenti delle tecniche utilizzate per raggiungere gli obiettivi del lavoro.

#### Bibliografia

- Amhar, F., Ecker R., 1996. An integrated solution for the problems of 3D man-made objects in digital orthophotos. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B4.
- Kraus, K., 1997. Photogrammetry, Vol. 2, Dümmlers Verlag.
- Boccardo P., Dequal S., Lingua A., Rinaudo F., 2001. True digital orthophoto for architectural and archaeological applications. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. vol. XXXIV - 5/W1, pp. 50-55
- Tucci, G., Bonora, V., Sacerdote, F., Costantino, F., Ostuni, D., 2004. From the acquisition to the representation: quality evaluation of a close range model, Proceedings of the XXth ISPRS Congress "Geo-Imagery Bridging Continents", Istanbul 2004, International Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV, part B5.



*Figura 6 - Uno dei fotogrammi scattati, in condizioni di presa pseudo-normale, con la camera Rollei 6008 con dorso digitale P25. Le condizioni di illuminazione ambientale favorevoli per la ripresa fotografica e l'elevata risoluzione dell'immagine consentono un'eccellente lettura dei dettagli; è di evidente rilevanza il valore documentario dei fotogrammi scattati.*