



Leonardo Paris
Architetto, professore associato della Università Sapienza di Roma nel SSD Icar17 - Disegno.
I suoi interessi didattico-scientifici riguardano la geometria descrittiva ed il rilievo digitale integrato. Da anni si occupa di rilievo dell'architettura sperimentando la metodologia che utilizza lo scanner laser 3D e la fotogrammetria digitale in relazione alla possibilità di interazione e integrazione dei dati

Fotogrammetria 2.0

Photogrammetry 2.0

La fotogrammetria intesa come disciplina scientifica attraverso cui rilevare le proprietà spaziali e formali di un oggetto da una o più immagini fotografiche, ha subito negli anni molte trasformazioni. L'uso nel titolo della notazione puntata, coniato da Tim O'Reilly nel 2004 riferita all'evoluzione del web, vuole rimarcare la portata di questa trasformazione. Si è sviluppato un nuovo concetto di metricità attraverso cui è possibile ricavare informazioni tridimensionali di un determinato oggetto utilizzando qualsiasi fotocamera. Le immagini fotografiche possono essere inoltre facilmente manipolate così da creare le più disparate condizioni proiettive, inimmaginabili sino a qualche decennio fa. Il contributo vuole rimarcare le modificazioni indotte nel passaggio dall'analitico al digitale e il ruolo della fotogrammetria nel rilievo digitale integrato valutando alcuni aspetti di integrazione e interrelazione con altre tecniche innovative di rilevamento strumentale.

Photogrammetry, the scientific discipline through which detect the spatial properties and form of an object from one or more photographs, has undergone many transformations. The use in the title of the dot notation, coined by Tim O'Reilly in 2004 related to the evolution of the web, wants to emphasize the scope of this transformation. A new concept of metric correlation has developed through which we can obtain three-dimensional information of an object using any camera. Photographic images can also be easily manipulated so as to create the most disparate projective relationships, unimaginable until a few decades ago. The paper aims to point out the changes induced in the transition from analytical to digital and the role of the new photogrammetry in the integrated digital survey considering some aspects of integration and interrelation with other innovative instrumental techniques of survey.

Parole chiave: modello fotografico, close range photogrammetry, image-based modeling, rilievo dell'architettura, fotografia digitale.

Keywords: photographic model, close range photogrammetry, image-based modeling, architectural survey, digital photo

PREMESSA

Nel 1839 due eminenti scienziati francesi, Jean François Dominique Arago e Louis Gay-Lussac, pronunciarono nelle loro sedi parlamentari due discorsi che sancirono di fatto la nascita della fotogrammetria solo pochi anni dopo che Joseph Nicéphore Niépce fissò su una lastra fotosensibile la prima immagine fotografica. Dice Arago: "Le immagini fotografiche sono sottomesse nella loro formazione alle regole geometriche, permettendo così di risalire alle dimensioni esatte delle parti più alte ed inaccessibili degli edifici." Ed ancora Guy-Lussac: "Nella fotografia la prospettiva di qualunque oggetto è riprodotta con una esattezza matematica; nulla sfugge all'occhio e al pennello del nuovo pittore" [1]. I presupposti scientifici qui richiamati si fondano sui principi della nuova geometria proiettiva teorizzata solo pochi decenni prima. La fotogrammetria, intesa come disciplina scientifica attraverso cui rilevare le proprietà spaziali e formali di un oggetto da una o più immagini fotografiche, diventa nel XX secolo uno dei principali metodi di rilievo indiretto strumentale che, fino ad allora, era incentrato esclusivamente sulle applicazioni topografiche. A dire il vero ancor prima della scoperta della fotografia e fino alla metà dell'800 si sperimentano con successo procedure di rilevamento indiretto per mezzo di disegni realizzati con strumenti prospettici come per esempio la camera lucida, o camera chiara, inventata da William Hyde Wollaston nel 1804; ma la scoperta della fotografia ha una portata talmente rivoluzionaria ed una diffusione così rapida da rendere subito obsolete tutte le altre ricerche e sperimentazioni. Uno degli aspetti più innovativi, come ha evidenziato Guy-Lussac, è la capacità di catturare istantaneamente nella fotografia tutta la realtà demandando ad una fase successiva la scelta di cosa rilevare e misurare; la macchina fotografica non seleziona nulla, non compie alcun atto critico verso l'oggetto rilevato. Cosa ben diversa dal rilievo topografico che impone delle scelte ben precise nel momento stesso in cui si acquisisce il dato. La fotogrammetria infatti, una volta definiti i parametri dei vari orientamenti (interno, relativo, assoluto), consente di ricavare misure a posteriori, in as-

senza dell'oggetto da rilevare, fondando la sua scientificità su uno statuto che è alla base della fotografia: l'essere considerata un *analogon* perfetto della realtà, un messaggio continuo che non necessita di un codice interpretativo in quanto il soggetto/referente viene riproposto in modo integrale. Nell'immagine fotografica permane una oggettività sostanziale che non fa altro che trasporre senza interferenze interpretative il momento della misura. C'è sicuramente un problema di qualità nella ripresa fotografica e nella organizzazione del modello fotografico che può avere ripercussioni al momento della restituzione; la novità sostanziale introdotta con la fotogrammetria è però evidente. L'oggettività del rilievo è una delle prerogative del modello fotografico ma poi segue inevitabilmente una fase di interpretazione nel momento in cui occorre tradurre in linee e superfici le entità materiche reali, decidendo cosa, quanto e come. Il rilievo pertanto come operazione di conoscenza e analisi si compie non tanto nella fase di acquisizione, cioè nel caso della fotogrammetria nel momento della ripresa fotografica e nella definizione degli orientamenti, ma nella riproposizione di uno o più modelli (grafico, infografico, bidimensionale o tridimensionale) che surrogano la realtà e che contengono al loro interno tutte le scelte e le discretizzazioni ritenute necessarie allo studioso che ha delle necessità di indagine specifiche.

L'evoluzione della disciplina scientifica nel '900 è caratterizzata da due periodi: il primo di tipo analogico, il secondo di tipo analitico con una progressiva specializzazione tecnica determinata, tra l'altro, dall'uso di macchine fotografiche sempre più sofisticate, definite appunto *metriche*. Nell'analitico, durato fino alla fine degli anni '80, la *metricità* di un apparecchio fotografico era garanzia della massima corrispondenza proiettiva tra l'oggetto reale e la sua immagine. Il passaggio dall'analitico al digitale con la rapida scomparsa del fotosensibile alogenuro d'argento in favore dei moderni sensori CCD e CMOS ha cambiato questa disciplina in un arco di tempo relativamente breve.

Ci troviamo così di fronte, oggi, ad una disciplina ~~rd~~ ~~icb~~ ~~mente~~ ~~tra~~ ~~formata~~ non solo da

punto di vista tecnico ma anche, e soprattutto, metodologico. Nella definizione di Fotogrammetria 2.0 l'uso della notazione puntata, coniata da Tim O'Reilly nel 2004 riferita all'evoluzione del web, vuole rimarcare la portata di questa trasformazione.

FOTOGRAMMETRIA DIGITALE E MODELLI DI RAPPRESENTAZIONE

Grazie all'enorme versatilità del digitale si è sviluppato un nuovo concetto di *metricità* attraverso cui è possibile ricavare informazioni tridimensionali di un determinato oggetto utilizzando qualsiasi fotocamera, anche quelle presenti nei dispositivi mobili quali smartphone o tablet, che montano ottiche a dir poco estreme se confrontate con le ottiche delle macchine metriche del secolo scorso.

Le moderne immagini fotografiche possono inoltre essere facilmente manipolate così da creare le più disparate condizioni proiettive, inimmaginabili sino a qualche decennio fa. Mi riferisco in particolare all'utilizzo della monoscopia multimediate, delle immagini piramidali o dei panorami sferici multimediate. Sono tutte procedure che consentono oggi di relazionarsi con lo spazio rappresentato in una maniera decisamente innovativa rispetto ai rigidi schemi proiettivi del XX secolo basati essenzialmente sul raddrizzamento prospettico e sulla stereofotogrammetria (fig. 1) [2].

L'apparente semplicità dei recenti software di fotogrammetria nasconde però alcune insidie, che se non ben conosciute, possono portare a dei risultati non oggettivi, declassando di fatto la fotogrammetria da disciplina scientifica a semplice applicazione. Un presupposto fondamentale è proprio quello della verifica della *metricità* del procedimento, basata sul principio di proiettività che si instaura tra una realtà tridimensionale ed una sua immagine, o un suo insieme di immagini come è oggi consuetudine.

Il modello fotografico con le sue interrelazioni con la modellazione tridimensionale rappresenta oggi uno strumento molto versatile di conoscenza e di gestione delle fasi di trasformazione insite in un progetto di restauro, anche perché è in grado di restituire con grande efficacia informazioni

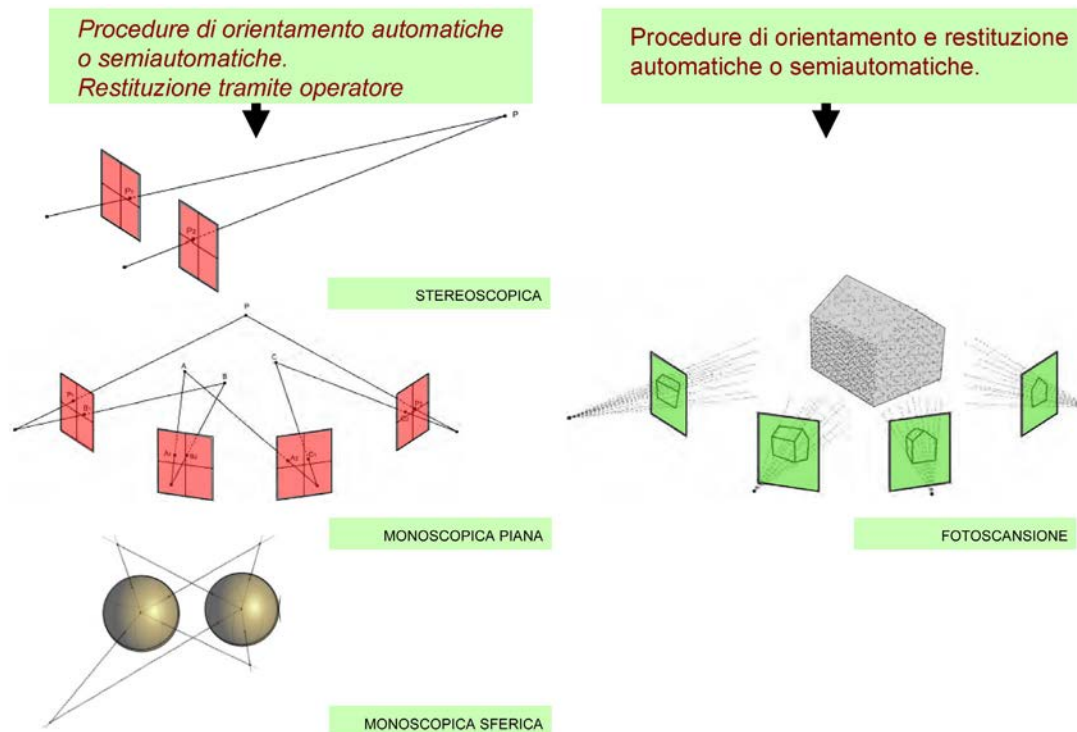


Fig.1, Procedimenti fotogrammetrici multimmagine

molto dettagliate sia sugli aspetti strettamente geometrici sia sulla qualità delle componenti materiali della superficie, ricavandone informazioni fondamentali per il progetto. La nuova fotogrammetria sembra essere in grado di coniugare maggiormente le esigenze di oggettività della rappresentazione, riducendone i costi grazie ad una progressiva diffusione delle tecniche digitale, ma salvaguardando al contempo le competenze scientifiche del rilevatore determinate da una conoscenza approfondita dei principi proiettivi che la sottendono. Abbiamo più volte utilizzato la definizione di *modello fotografico* che va ad ampliare la già nota casistica dei modelli in uso nell'architettura. Per comprendere meglio alcune valutazioni che faremo in seguito è forse opportuno un chiarimento terminologico a scanso di equivoci.

Il *modello geometrico* che simula una realtà architettonica (sia essa esistente o solo immaginata) può oggi essere "tradotto" in un *modello informatico* gestibile attraverso specifici software. Al di là dei tradizionali *modelli grafici*, analogici o digitali, si può pensare di rappresentare lo spazio tridimensionale attraverso *modelli matematici* Nurbs, in cui le forme geometriche sono descritte per mezzo di equazioni, e *modelli numerici* o poligonali mesh, in cui tutte le superfici vengono scomposte in forme piane semplici, nella maggior parte dei casi triangoli, attraverso l'individuazione di vertici. Nel primo caso si ha una rappresentazione di tipo continuo, nel secondo di tipo discreto. Rispetto a questo quadro di conoscenze ormai consolidato negli ultimi anni ha fatto prepotentemente la sua comparsa un altro tipo di modello, quello della *points-cloud* che può essere ricavato

da un processo di scansione laser o anche, come vedremo, da applicazioni di fotogrammetria. Se si immagina che ogni punto sia il vertice di un triangolo ecco che la *points-cloud* può essere intesa come un vero e proprio modello tridimensionale di tipo discreto, in quanto la pura e semplice conversione in mesh (cioè in superficie numerica) della *points-cloud* non modifica in alcun modo le informazioni di base. Da quanto detto la *points-cloud* può essere definita come *modello numerico per punti*, a differenza di una mesh definita come *modello numerico per superfici*. Potremmo fare anche una ulteriore osservazione riguardo le superfici poligonali, poichè queste si possono ottenere come detto elaborando una *points-cloud* o anche convertendo una superficie Nurbs; in quest'ultimo caso i punti di discretizzazione di una superficie continua mantengono una ottima corrispondenza con il modello geometrico per cui sono sicuramente più affidabili metricamente di una mesh ricavata da una *points-cloud*, soprattutto quando si vogliono individuare nel modello i punti, gli spigoli o le linee che sono il fondamento del modello geometrico.

CORRELAZIONI PROIETTIVE NELLE APPLICAZIONI FOTOGRAMMETRICHE

Proviamo ora a sintetizzare le principali applicazioni di fotogrammetria digitale comunemente utilizzate nel rilievo dell'architettura, nel rilievo archeologico, nei progetti di restauro, risanamento e conservazione, nei processi di gestione e valorizzazione dei beni culturali.

La prima è quella del raddrizzamento fotografico, che richiama alla memoria le ormai superate applicazioni di restituzione prospettica, cioè le applicazioni pratiche del cosiddetto problema inverso della prospettiva [3]. Molti software di uso comune consentono facilmente di raddrizzare



Fig.2. Museo Barracco di Roma. Raddrizzamento fotografico del prospetto su corso Vittorio Emanuele II

una fotografia, ricavando dalla proiezione centrale una immagine ortografica corrispondente in scala ridotta alle porzioni reali dell'oggetto (figg. 2, 3). Questa procedura ha delle limitazioni ed inoltre, in funzione dell'errore di graficismo ritenuto ammissibile, prevede alcune accortezze preliminari sia in fase di ripresa sia in fase iniziale di elaborazione. Mi riferisco in primo luogo al fatto che il raddrizzamento è sempre relativo a porzioni planari della superficie dell'oggetto da rilevare; pertanto il rapporto di omologia che si instaura tra la realtà e la sua immagine cambia continuamente in funzione dei diversi piani che conformano l'oggetto. Il procedimento proiettivo di base può inoltre essere alterato dalle deformazioni indotte dalle lenti dell'obiettivo, per cui l'immagine fotografica può presentare delle distorsioni di vari tipo (a barilotto, a cuscinetto o miste) che la versatilità del digitale consente oggi di controllare e se necessario eliminare, una

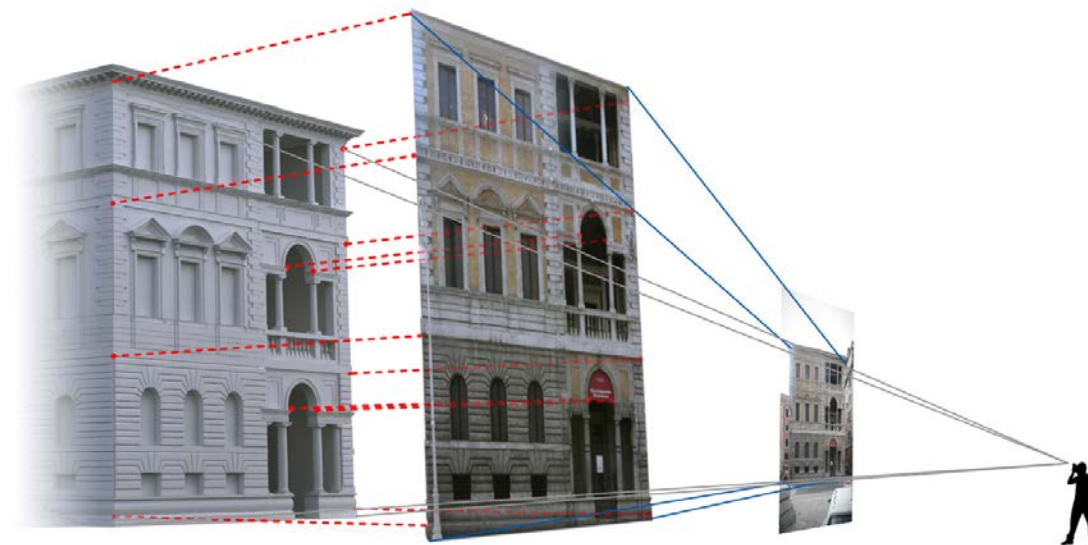


Fig.3. Correlazione proiettiva tra raddrizzamento fotografico e modello tridimensionale

volta noti i parametri di calibrazione dell'obiettivo o della macchina [4]. L'applicazione dei parametri di calibrazione consente di correggere con grande facilità e con ottimi risultati anche immagini molto deformate, come per esempio quelle ottenute con un obiettivo fisheye (fig. 4). Tra le accortezze di cui tener conto in fase di ripresa c'è sicuramente l'angolo di inclinazione tra i due piani omografici; tale angolo può infatti influenzare non poco la qualità dell'immagine raddrizzata, tenendo conto della risoluzione in pixel sul piano, della profondità di campo, della messa a fuoco (fig. 5). Ricordiamo infatti che in tutti i procedimenti di fotogrammetria digitale alla fase di acquisizione segue sempre una fase di elaborazione che può essere di tipo automatico ma anche non automatico e che in entrambi i casi il risultato che si ottiene dipende anche dalla qualità dell'immagine di partenza (fig. 6). La fotogrammetria analitica nel periodo di suo

maggior sviluppo si basava sostanzialmente sulla stereofotogrammetria che ne rappresentava l'applicazione sicuramente più innovativa e altamente specializzante della disciplina. Nella conversione digitale, a parte qualche sporadico tentativo iniziale, la stereofotogrammetria è diventata del tutto marginale. Si sono infatti man mano affermati software di fotogrammetria monoscopica che utilizzano anche un consistente numero di immagini fotografiche che riproducono uno stesso oggetto aumentando notevolmente il campo di corrispondenza proiettiva tridimensionale. Se infatti nella stereofotogrammetria analitica la visione stereoscopica consentiva di operare con un modello per volta, nella fotogrammetria multimmagine c'è in molti casi la possibilità di lavorare simultaneamente su uno spazio più ampio e versatile (fig. 7). In pochi anni si è passati da una prima fase in cui, attraverso l'applicazione di algoritmi di ri-

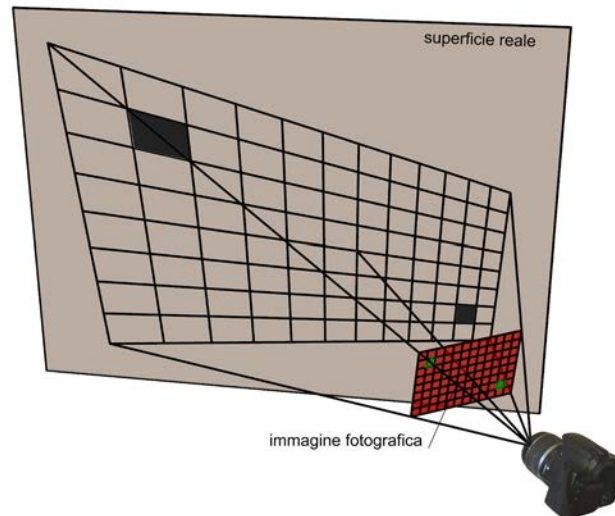


Fig.4, Elaborazione di una fotografia con obiettivo fisheye

Fig.5, Corrispondenza tra pixel immagine e la loro proiezione sulla superficie reale

Fig.6, Immagine equirettangolare da cui ricavare un panorama sferico. Piazza San Francesco a Rieti



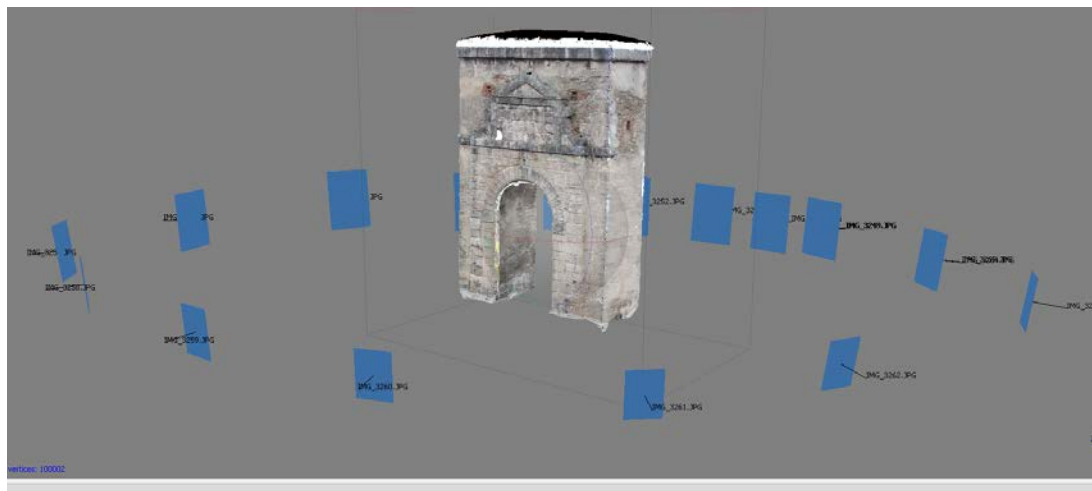
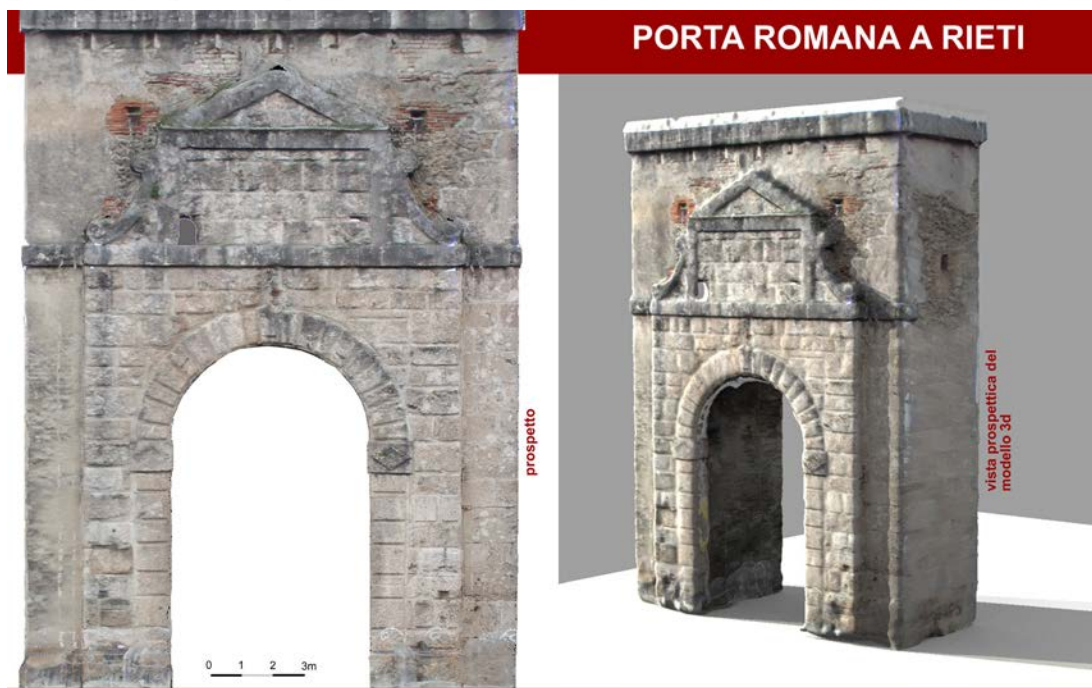


Fig.7, Fotogrammetria multimagine

Fig.8, Porta Romana a Rieti. Modello tridimensionale ottenuto per fotoscansione



conoscimento automatico di punti omologhi su due o più foto distinte, si è automatizzata la procedura di orientamento interno e relativo (cioè l'individuazione del centro di proiezione e della posizione relativa delle diverse immagini utilizzate), ad una seconda fase in cui il riconoscimento automatico si è esteso a tutto l'oggetto fotografato. Con la cosiddetta *fotoscansione* [5] si può ottenere da due o più foto prima di tutto una points-cloud, dalla quale ricavare una superficie poligonale di tipo mesh e contestualmente mappare la superficie con i valori RGB ricavati dalle foto che hanno dato origine alla points-cloud (fig. 8). I software di fotoscansione si basano sugli algoritmi di Structure from Motion (SfM) sviluppati nell'ambito della computer vision. A questi si aggiungono anche processi di calcolo iterativi per la determinazione dei parametri di calibrazione attraverso la risoluzione di bundle adjustment. Incrociando le informazioni desumibili da più immagini digitali di uno stesso oggetto, ed applicando procedure proprie della cosiddetta geometria epolare [6], è possibile ricavare un insieme di punti di legame (o punti omologhi) in grado di determinare l'orientamento relativo tra le diverse immagini fotografiche e conseguentemente la posizione nello spazio di punti dell'oggetto. Per elaborazioni successive è possibile infittire la corrispondenza di punti omologhi ottenendo così delle points-clouds in alcuni casi anche di buona quantità e qualità metrica.

Chi ha avuto modo di sperimentare questa tecnica si è reso subito conto della estrema facilità di utilizzo da un lato ma anche di alcune forti limitazioni dall'altro. Alcuni studiosi pensano che la points-cloud ricavata per fotoscansione sia una alternativa ad una points-cloud ottenuta con uno



Fig.9, Piazza San Francesco a Rieti. Prospetto est. Vista ortografica ricavata dalla points-cloud renderizzata per mezzo di un panorama sferico (fig. 6) eseguito con un kit camera esterno allo scanner.

scanner laser. Sappiamo che le modalità di acquisizione del dato metrico sono molto diverse; come sono molto diverse le relative points-cloud. Nella fotoscansione la qualità della points-cloud (da cui dipende, ricordiamo, la qualità della mesh) è condizionata da molti fattori: in primo luogo la caratteristica materica della superficie dell'oggetto rilevato; se questa superficie presenta una buona texture (muri in pietra o mattoni, pareti affrescate ecc.) il risultato può essere soddisfacente. Per superfici con pochi elementi di riconoscimento o con pareti monocolori viene meno l'individuazione dei punti omologhi con errori anche molto evidenti. La qualità della fotoscansione è condizionata inevitabilmente dalla

qualità dell'immagine fotografica sulla base di alcuni concetti che abbiamo già messo in evidenza parlando del raddrizzamento fotografico. Inoltre c'è da sottolineare che per ottenere una buona points-cloud con un'alta risoluzione reale [7] è necessaria oggi una capacità di elaborazione che spesso va ben oltre quella dei computer commerciali anche se di target elevato. E' una limitazione che andrà sicuramente assottigliandosi vista la crescita esponenziale delle qualità dei processori e delle schede di memoria. L'aspetto sicuramente più importante da mettere in risalto riguarda la qualità della superficie mesh alla quale è demandato l'aspetto metrico del rilievo tridimensionale.

Detto in altri termini quello che conta sempre di più è verificare l'attendibilità e le possibilità di gestione del modello tridimensionale ottenibile dalla fotoscansione. Il modello mesh come sappiamo è un modello numerico, non matematico, per cui, se non in casi molto particolari, è impegnativo ricavare informazioni geometriche precise se non attraverso procedure manuali di trasposizione di alcuni dati metrici significativi ricavati dal modello mesh ed importati in un modello matematico. La geometria di una superficie di rotazione o di estrusione deve passare necessariamente per l'identificazione delle sue generatrici e direttrici. Ma molto spesso gli stessi enti geometrici fondamentali (punto, linea e superficie) per essere ben identificati nel modello mesh necessitano di una elaborazione condizionata proprio dalla qualità della superficie stessa.

Cosa ben diversa se si utilizza il modello fotografico per ottenere direttamente superfici mesh già in qualche modo riconducibili a modelli geometrici matematici perché in questo caso nel passaggio dall'uno all'altro non c'è perdita di qualità metrica

La fotogrammetria digitale si avvale quindi anche di un altro sistema di correlazione tra l'immagine e l'oggetto reale basato sullo stesso principio della fotoscansione per determinare e orientare l'oggetto interno e relativo ma che si avvale successivamente di una fase di modellazione utilizzando come base una libreria di superfici poligonali primitive per poi procedere ad un progressivo adattamento ed affinamento di queste superfici proprio grazie alla corrispondenza proiettiva con il modello fotografico [8].

Una particolare applicazione di corrispondenza proiettiva è quella che si instaura per esempio tra



Fig.10, Piazza San Francesco a Rieti. Vista prospettica del modello matematico semplificato con l'inserimento di mesh ricavate per fotoscansione. Il modello texturizzato è stato mappato con lo stesso panorama sferico (fig. 6) utilizzato per renderizzare la points-cloud.

uno o più panorami sferici e uno specifico contesto spaziale.

Se nel modello informatico si è in grado di posizionare il centro del panorama nel punto esatto corrispondente al punto nodale dell'obiettivo fotografico e di orientarlo nello spazio virtuale alcuni software di modellazione consentono oggi di proiettare in tempo reale il panorama sferico sulle superfici che possono essere a loro volta modificate per adattarle alla corrispondenza proiettiva (fig. 9).

Il panorama sferico in questo caso è una immagine che si presta particolarmente bene a questo tipo di applicazione perché da un lato l'immagine stessa nel momento in cui si assemblano le diverse immagini fotografiche si auto compensa rispetto alle possibili distorsioni dell'obiettivo; dall'altro

perché riesce a ricoprire ampi spazi rispetto ad immagini fotografiche singole per le quali può risultare più difficile l'operazione di orientamento assoluto, cioè del giusto posizionamento nel modello informatico del centro di presa e della direzione dell'asse ottico (fig. 10).

L'uso del panorama sferico si riferisce in questo caso ad una modalità di applicazione fotogrammetrica di tipo per così dire ibrido, associato ad altri metodi di rilevamento come quello topografico o scanner laser, perché si correla con una serie di informazioni metriche ricavate con altri sistemi di misura. Anche se si può osservare che la necessità di avere informazioni metriche di base è una prerogativa di tutte le applicazioni di fotogrammetria, sia quella analitica degli anni '80 del secolo scorso sia in quella digitale.

CONCLUSIONI

Nel passaggio dall'analitico al digitale abbiamo visto come la fotogrammetria ha notevolmente ampliato le possibilità di correlazione proiettiva tra uno spazio fisico e la sua rappresentazione per immagini, aprendo nuovi scenari di interrelazione ed integrazione con gli altri metodi di rilevamento da quello topografico a quello scan laser. Le applicazioni fotogrammetriche consentono oggi di rapportarsi con lo spazio tridimensionale nelle più svariate condizioni ambientali e dimensionali, dalla scala territoriale fino al più minuto dettaglio architettonico. Non è possibile in questa sede sintetizzare le differenti problematiche che contraddistinguono ciascuna applicazione perché l'esperienza dimostra che a ciascun ambito, da quello territoriale e urbano a quello archeologico e architettonico, corrisponde una particolare esigenza di rappresentazione e di modellazione. Quello che è importante sottolineare in questo caso è che il modello fotogrammetrico oltre a contenere in nuce tutte le informazioni di tipo metrico che consentono di indagare la forma e la geometria dello spazio tridimensionale diventa anche portatore di tutte quelle qualità superficiali che solo l'immagine fotografica è in grado di restituire. Si instaura così un interessante rapporto di biunivocità tra il modello tridimensionale e l'immagine bidimensionale così che si possa facilmente trasferire informazioni da uno all'altro indistintamente. Questo consente di avere oggi un formidabile strumento di analisi per la progettazione e l'attuazione di interventi di restauro, risanamento e conservazione, nei processi di gestione e valorizzazione dei beni culturali.

NOTE

[1] Tratte da A. Laussedat, *La Métro-photographie*, Parigi 1899.

[2] Tulle le immagini sono a cura dell'autore ad eccezione delle figure 2 e 3 elaborate da Wissam Wahbeh.

[3] Per uno studio approfondito sull'evoluzione storica del problema inverso della prospettiva cfr. Paris L. 2014.

[4] I parametri di calibrazione di un obiettivo sono oggi disponibili in alcuni software di grafica come Photoshop o possono essere ricercati tramite web. In mancanza di questi dati è possibile comunque calibrare un obiettivo con procedure che prevedono l'utilizzo di immagini (a video o su carta) formate da target a contrasto bianco/nero.

[5] In molti contributi scientifici di fotogrammetria questa procedura viene denominata anche fotomodellazione che è anch'esso un neologismo tipicamente italiano. Entrambi i termini non hanno un termine equivalente nella lingua anglosassone dove si utilizza comunemente la definizione di image-base modeling oltre al più classico photogrammetry. In Italia il termine fotomodellazione è stato introdotto da Livio De Luca nel 2011 (cfr. De Luca L. 2011) e subito ripreso da altri ricercatori per identificare una differente procedura di modellazione tramite riconoscimento di punti omologhi su più immagini fotografiche con una prima elaborazione di un point-cloud e successive elaborazioni di mesh texturizzate. Si ritiene in questo caso più pertinente usare il termine fotoscansione. Per un approfondimento sul tema cfr. Paris L. 2012.

[6] La geometria epipolare studia le correlazioni proiettive che si instaurano tra coppie di immagini fotografiche al fine di ridurre l'area di ricerca delle corrispondenze sia attraverso l'analisi vettoriale che per pixel

[7] La risoluzione reale corrisponde alla distribuzione di pixel o punti scan laser sull'oggetto reale e dipende prevalentemente dalla forma delle superfici e dalla posizione di acquisizione fotografica o dello scanner; la risoluzione strumentale dipende dalle caratteristiche e dai relativi settaggi degli strumenti di acquisizione digitale.

[8] Ci riferiamo in questo caso alla procedura di fotomodellazione utilizzata da alcuni software come image modeler della Autodesk. Cfr. De Luca L. 2011.

BIBLIOGRAFIA

Fondelli, Mario (1992). *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Roma

Beozari, G., Monti, C., Selvini, A. (1992) *La fotogrammetria per l'architettura*, Napoli

Atkinson, K.B. (2001). *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing

Paris, Leonardo (2003). *La restituzione stereofotogrammetrica nel rilevamento architettonico*, In *Gli Strumenti di conoscenza per il progetto di restauro*. Valmontone (Roma) Atti del convegno 9,10,11, set. 1999; Roma.

Mueller, P., Zeng, G., Wonka, P., Van Gool, L. 2007. *Image-Based Procedural Modeling of Facades*. ACM Trans. Graph. 26, 3, Article 85

Fangi, Gabriele (2009). *Further Developments Of The Spherical Photogrammetry For Cultural Heritage*, 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japan

Filippucci, Marco. (2010). *Nuove di pixel. La fotomodellazione con software liberi per il rilievo dell'architettura*. In *Disegnarecon*, vol. 3, n. 6.

Wahbeh, Wissam (2011). *Architectural Digital Photogrammetry. Panoramic Image-based Interactive modeling*. Tesi di dottorato di ricerca in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, Ciclo XXIII.

De Luca, Livio (2011). *La Fotomodellazione Architettonica*, Dario Flaccovio Editore, 2011.

Borgogni, Francesco (2012). *Rilievo per immagini: la fotomodellazione*. Tesi di dottorato di ricerca in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, Ciclo XXIV.

Remondino, Fabio (2011). *Rilievo e modellazione 3D di siti e architet-*

ture complesse. In *Disegnarecon*, vol. 4, n. 8. ISSN 1828-5961

Sinha, Sudipta N. et al. 2008. *Interactive 3D Architectural Modeling from Unordered Photo Collections*.

Paris, Leonardo (2012). *Fotogrammetria e/o fotoscansione in*, a cura di Andrea Casale, *Geometria descrittiva e rappresentazione digitale. Memoria e innovazione*. Vol.II. Roma

Carpiceci, Marco (2012). *Fotografia digitale e Architettura*, Roma, Aracne editrice.

Pablo Rodriguez, Navarro, a cura di (2013) *Disegnare con la fotografia digitale*, *Disegnarecon* vol. 6 n. 12

Carpiceci, Marco (2013). *Conoscenza geometrica e rigore scientifico della fotografia digitale: il caso della fotografia nodale*, in *Disegnarecon* vol. 6 n. 12

Pedro, Cabezas-Bernal, Juan, Cisneros-Vivó (2013) *La restituzione fotogrammetrica 2D/3D di elementi architettonici e l'integrazione dei modelli virtuali sulle fotografie dell'intorno reale, mediante programmi CAD, software liberi e fotocamere convenzionali*, in *Disegnarecon* vol. 6 n. 12

Cannella, Mirco (2013) *Valutazioni sull'impiego della fotogrammetria sferica nella costruzione di modelli digitali 3D: l'oratorio della chiesa di Santa Caterina a Zejtun (Malta)*, in *Disegnarecon* vol. 6 n. 12

Pucci, Mirco (2013). *Prima che appaia il "divieto di fotorilievo": considerazioni sulla foto modellazione*. In *Disegnarecon* vol. 6 n. 12

Di Tondo, Sergio e Fabrizi, Elena (2013) *Metodologie e tecniche di fotomodellazione a confronto: il caso del "Tempio Grande" di Abu Simbel*. In *Disegnarecon* vol. 6 n. 12

Rizzo, Elisa (2013) *La modellazione 3d applicata ai beni culturali: la*

Pieve di San Giovanni Battista a Caviglia, in *Archeomatica* n. 3 del 2013

Zambruno, S. and Vazzana, A. and Buti, L. and Orlandi, M. (2013) *Cloud computing e fotomodellazione come integrazione della modellazione 3D per l'architettura storica*. *La chiesa di San Giovanni Evangelista in Ravenna*. *Archeologia e Calcolatori*, 24.

Gonizzi Barzanti, Sara (2013) *Tecniche di rilievo tridimensionale in archeologia*, in *Archematica* n. 4 del 2013

Paris, Leonardo (2014). *Dal problema inverso della prospettiva al raddrizzamento fotografico*, Roma, Aracne editrice

Wahbeh, Wissam (2014). *Il raddrizzamento fotografico in Leonardo Paris Dal problema inverso della prospettiva al raddrizzamento fotografico*, Roma 2014