



Marco Filippucci

Roma, 1979. Laureato in ingegneria civile (indirizzo edile) presso l'Università degli Studi di Perugia, dottorando del corso di *Scienze della Rappresentazione e del Rilievo*, presso la "Sapienza" Università di Roma, collabora con la Sezione IDeA della Facoltà di Ingegneria di Perugia e presso il Laboratorio di Analisi e Rilievo delle Trasformazioni Urbane della "Sapienza" Università di Roma.

Nuvole di pixel. La fotomodellazione con software liberi per il rilievo d'architettura. *Pixel clouds. Free photomodelling software for architectural survey.*

La fotomodellazione è una innovativa tecnologia digitale che permette di creare, a partire da semplici immagini *raster*, una nuvola di punti tridimensionali. La sua carica di rinnovamento si esplicita in particolare nella economicità degli strumenti che, a fronte degli spesso inaccessibili *laser scanner*, si appoggia invece sulle comuni macchine fotografiche digitali. Inoltre enti di ricerca internazionali hanno sviluppato programmi *open source* che permettono la creazione del modello numerico e la successiva rielaborazione della nuvola di punti. Basandosi su esperienze di ricerca personali e sulla successiva attività didattica, l'obiettivo dello studio è analizzare la logica di questi processi per verificarne l'applicabilità nel campo di ricerca architettonico, effettuando un percorso utile a comprendere le procedure informatiche e a determinare criteri per la

valutazione della loro affidabilità.

Photomodelling refers to the innovative process in the digital environment, which transforms simple raster images into a three-dimensional model. The revolution of this technique is particularly explicit in a comparison of the cost of the instruments, the so inaccessible laser scanners on one hand, and the common digital cameras on the other hand. Furthermore, international research organizations have developed open source software that allows the creation of the numerical model and the elaboration of the point cloud. Based on personal research experiences and after on the teaching support, the aim of the study is to analyze the logic of these processes, to verify its applicability in the field of architectural research, making a useful way to understand

the computer procedures and to determine criteria for evaluation of their reliability.



1. Modello del leone nel cortile di Sant'Ivo alla Sapienza a Roma: nuvola di punti creata con ARC3D ed elaborata con MeshLab (Marco Filippucci).

Con il termine 'fotomodellazione'[1] si intende il processo di operazioni effettuate in ambito digitale con le quali, a partire da immagini *raster*, si giunge alla creazione di un modello tridimensionale. Negli ultimi anni, nel campo della conservazione e valorizzazione dei beni culturali tali tecniche stanno riscuotendo un grande successo attestandosi come una delle frontiere del rilevamento passivo[2].

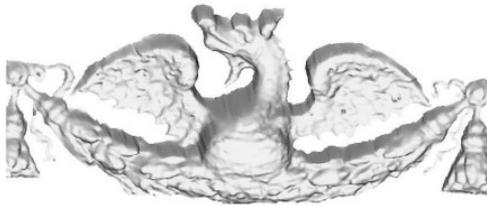
La fotomodellazione è il frutto della rivoluzione digitale che ha investito tutti gli artefatti della nostra cultura, dalle immagini agli strumenti dell'interpretazione e del disegno, e può essere considerata come uno sviluppo della *fotogrammetria*, "scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell'ambiente circostante mediante processi di registrazione, misura e interpretazione delle immagini fotogra-

fiche e digitali formate dall'energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici"[3]. Infatti i requisiti imposti da questa definizione sono gli stessi che configurano il percorso di fotomodellazione che permette di individuare punti misurabili nello spazio tridimensionale, frutto del processo di interpretazione di immagini digitali. Rimane soltanto da verificare il requisito di affidabilità delle informazioni, prerogativa messa in dubbio da un processo in gran parte automatizzato che deve essere compreso nella sua logica procedurale, al fine poi di comprovarne l'applicabilità nell'ambito del rilievo "scientifico".

Il processo di fotomodellazione interessa ciascun fotogramma, da intendersi nella sua nuova accezione di matrice digitale di dati numerici: attraverso un confronto sono individuate le corrispondenze dei dati e da

qui, sulla base della geometria epipolare che sostiene i principi della fotogrammetria monoscopica[4], è stimata la mutua posizione di ciascun *pixel* caratterizzato poi da un colore che determina la *texture* del modello.

Se il *laser scanner* è una tecnologia basata sulla fisica delle onde[5], la fotomodellazione sfrutta invece i *principi* dell'ottica puntando sulla semplicità ed economicità delle strumentazioni necessarie, una semplice camera fotografica digitale, possibilmente *reflex*[6]. I grandi *vantaggi* sono quindi legati ai costi, estremamente contenuti, alla sua applicazione per risolvere problemi di accessibilità e alle possibilità di ottenere modelli dettagliati. Poiché infatti le nuove tecnologie portano le camere digitali ad essere fornite di ottimi CCD, i *file raster* creati sono oramai sempre definiti da milioni

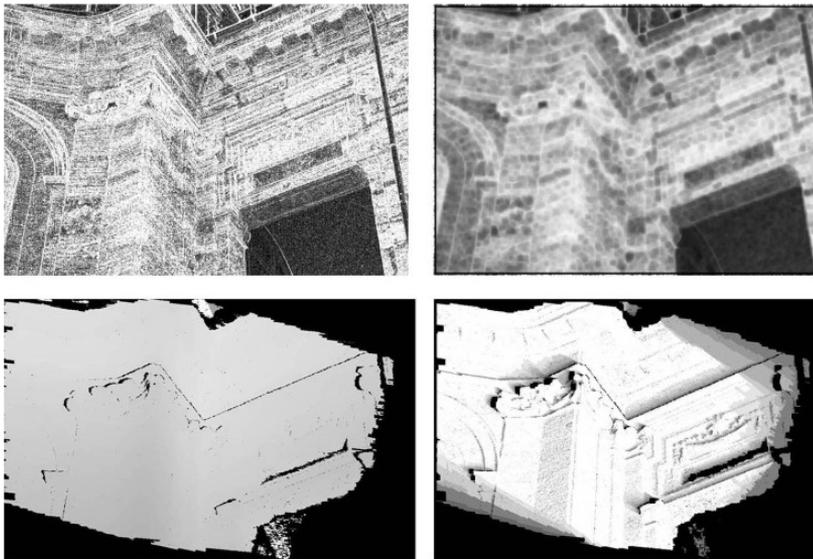


2. Modello del drago nel cortile di Sant'Ivo alla Sapienza a Roma: elaborato finale (sopra) e visualizzazione della nuvola in *itinere* con *texture* in MeshLab (Marco Filippucci).



di *pixel*, e proporzionalmente il risultato della fotomodellazione raggiunge quest'ordine di punti. In particolare quindi risulterà estremamente significativo l'aspetto percettivo del modello tridimensionale, caratterizzato da una mappatura prettamente corrispondente al reale. Gli *svantaggi* principali sono invece connessi alla stretta dipendenza del rilievo dal contesto ambientale, ovvero dall'intrinseco rapporto fra le immagini generatrici e il modello ottenuto ed è evidente quindi come in determinate condizioni di luce sia probabile il mancato raggiungimento di soddisfacenti risultati. Dal punto di vista operativo, per effettuare la fotomodellazione esistono diversi programmi che spesso hanno logiche profondamente dissimili[7]. In questa analisi, frutto del personale percorso di ricerca[8], si propone l'utilizzo di due *software liberi*[9],

ARC3D[10] e MeshLab[11], realizzati in collaborazione dal Visual Computing Lab of CNR-ISTI (Italy) e dall'ESAT-PSI Lab of K.U.Leuven (Belgium), entrambe legate al *network* EPOCH[12]. ARC3D è un *web service* che, una volta acquisite le foto, le restituisce corredate di calibrazione della camera, di una mappa delle profondità ed una della qualità di ciascuna immagine, tutti parametri dai quali sarà poi possibile ricavare, attraverso il confronto fra i diversi fotogrammi, un attributo spaziale e la relativa affidabilità. I passaggi fondamentali da attuare per avere i dati utili alla creazione della nuvola sono estremamente semplici: fotografare l'oggetto, inviare le immagini al *server*[13], e, dopo la segnalazione dell'avvenuta ricostruzione, effettuare il *download* dei *file* processati. L'unica accortezza pratica è verificare prima

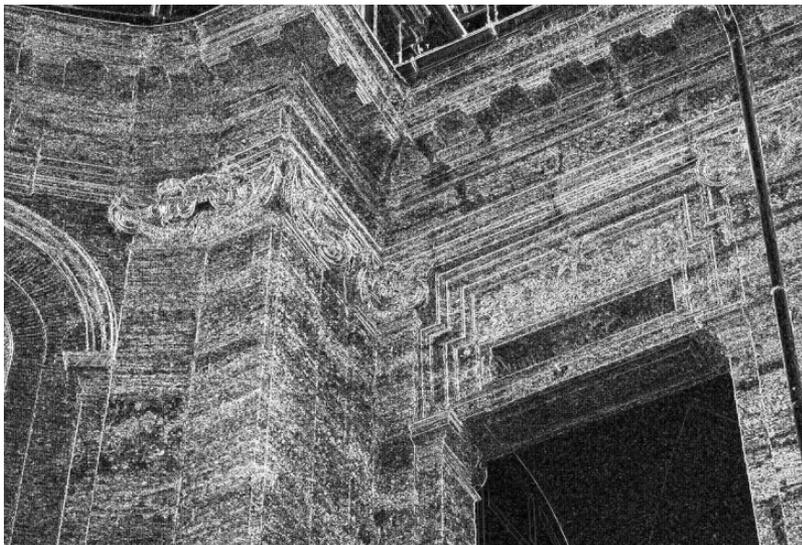


3. 3bis. Modello del mascherone per il capitello d'angolo nel cortile di Sant'Ivo alla Sapienza a Roma: filtri sulle immagini effettuati da ARC3D e modello finale (Marco Filippucci).

della processazione che non siano presenti immagini sfocate che corromperebbero la qualità finale del risultato digitale[14]. Essendo il modello strutturato evidentemente dalle immagini di partenza, una corretta presa dei fotogrammi non può che influenzare positivamente l'accuratezza del risultato finale. In particolare l'immagine deve essere genericamente circoscritta alla sola area in esame, i fotogrammi non devono essere troppo distanti l'uno dall'altro e, anche se non c'è bisogno di posizionarsi in modo referenziato all'oggetto, è buona norma effettuare un percorso a semicirconferenza con prese ogni 15-30° circa, ricavando così, in virtù della loro equidistanza, una sequenza di immagini facilmente confrontabile[15]. Come avviene nelle scansioni laser, la nuvola stimata sarà segnata da coni d'ombra, consequenziali alla presa, imperfezioni che

devono essere puntualmente corrette nelle operazioni di finitura e ottimizzate anche allineando nuvole complementari. A differenza di altri *software*, in ARC3D non è richiesta la calibrazione della macchina, né la referenziazione dei punti di presa. Come già evidenzia il nome stesso, acronimo di *Automatic Reconstruction Conduit Tridimensional*, il programma *automaticamente* effettua una corrispondenza fra immagini, sempre *automaticamente* computa la calibrazione della macchina e ancora in modo *automatico* trova le corrispondenze fra gli elementi noti dalla geometria proiettiva delle differenti rappresentazioni[16]. Queste operazioni, legate a tecnologie conosciute in letteratura come *Structure from Motion pipeline*[17], si basano su un confronto di corrispondenze fra tutti i *file* inviati, immagini non calibrate, differenziandosi

così dalle più comuni procedure di *opportunistic pipeline*[18] facilitate dalla disposizione sequenziale dei fotogrammi[19]. Ogni coppia di foto viene mutuamente commisurata attraverso un algoritmo di *Global Image Comparision*[20] con il quale, a seguito della sovrapposizione delle matrici *raster*, ciascun elemento posto in corrispondenza è utilizzato per costruire una geometria epipolare[21]. Attraverso funzioni di *Normalized Cross Correlation*[22] sono applicati sistemi matriciali processati in parallelo (*parallel pipeline*)[23], un calcolo che però sarebbe troppo impegnativo se non fosse imposto precedentemente un sottocampionamento[24], riduzione che permette di ottimizzare i tempi di elaborazione e la possibilità di errore nelle corrispondenze[25]. Considerando che l'elaboratore non ragiona su linee e punti, ma su discontinuità e corrispondenze fra gli attri-



buti della matrice numerica, si intuisce come un confronto quantitativamente impegnativo sopperisca alla puntualità della calibrazione che genericamente impone una lettura sequenziale. Dal riscontro determinato in ciascuna coppia di immagini è stimata la geometria *epipolare*, la cui affidabilità è garantita da una richiesta di corrispondenza tripla: saranno pertanto valutati i punti che sono presenti almeno in tre fotogrammi, da cui la necessità di un minimo di sei immagini per creare la nuvola di *pixel*. Attraverso algoritmi statistici[26] vengono poi esclusi i risultati meno attendibili ottimizzando i valori delle corrispondenze e le distorsioni radiali la cui deviazione e varianza saranno comunque annotate[27], un metodo simile con cui viene poi stimato anche l'attributo grafico del punto[28].

Una volta ritornati all'utente i *file* processati, si può utilizzare *MeshLab*[29] per creare e gestire la nuvola di *pixel*. La sua costruzione è consequenziale all'assegnazione di parametri "fondamentali" che interpretano i dati misurati. In particolare il primo parametro richiesto è il *subsample*, il "sottocampionamento", la riduzione del numero di *pixel* in uscita: aumentando il valore diminuisce la definizione dei punti del modello, variazione che comunque può garantire un migliore risultato[30]. Un secondo parametro fondamentale è il *minimum count*, la "corrispondenza" fra gli elementi: si tratta di individuare in quante immagini il programma debba trovare il punto stimato per accettarne il valore[31]. A questo si lega poi uno dei punti di forza di *MeshLab*, la sua fruizione grafica: nella prima interfaccia del *software*, ciascuna immagine caricata viene

associata ad uno schema gradualmente colorato in funzione della corrispondenza fra i punti[32]. Queste immagini devono essere utilizzate anche per calcolare la *texture* del modello[33], inoltre per ciascuna è possibile disegnare una maschera che deseleziona ed elimina le parti che non interessano il rilievo[34].

Ulteriori parametri hanno il compito dell'*outlier management* e del *noise management*, ovvero di gestire le deviazioni e il rumore insiti nelle immagini e quindi di ciascun modello numerico da loro generato. Tali errori sono legati sia alle caratteristiche intrinseche degli strumenti di misurazione, ovvero le camere fotografiche, in particolare alle deformazioni delle ottiche, sia a fattori estrinseci, dovuti alle condizioni al contorno, alla disuniformità della luce e alle proprietà dei materiali[35]. Per ottimizzarli già prima





La scultura nella foto



Il particolare dell'occhio

[nella pagina precedednte]
4. Modello della fontana d'angolo nel cortile di Sant'Ivo alla Sapienza a Roma: nuvola di *pixel* e *mesh* con *texture* del mascherone, *render* nel modello geometrico (Marco Filippucci).

[in questa pagina]
5. Modello della formella del leone di Palazzo Donini a Perugia (Eugenio Bini, corso di Tecniche della Rappresentazione, Università degli Studi di Perugia, a.a. 2009-10).

di calcolare i punti della nuvola, si possono effettuare una serie di operazioni determinando i seguenti parametri: con il *minimum angle* si può settare l'angolo accettato fra le *mesh*, eliminando gli elementi con angoli più acuti[36]; con *remove pieces less then* si applica un filtro che cancella quei pezzi sparsi prodotti per lo più dal rumore; con *close holes less then* si possono chiudere tutte quelle aree aperte del modello la cui distanza da altre è minore di un determinato numero di *pixel*; con *feature aware smoothing* si può applicare una smussatura alle *mesh*; imponendo una dilazione (*dilation*) ed erosione (*erosion*), una sorta di *smooth* monodimensionale, si possono interpolare con maggiore uniformità i punti stimati[37]; con *fast merge* si può cercare di ricreare velocemente il contorno[38], mentre *scaling factor* permette di imporre una riduzione

globale al modello. Dopo aver settato i parametri richiesti, il software genera la nuvola di *pixel*. Solitamente sono necessari più tentativi[39], comunque inevitabilmente l'interpolazione delle *mesh* sarà imperfetta, con coni d'ombra o altri errori consequenziali al settaggio dei parametri nonché alla scelta automatizzata dei punti interpolati. La seconda fase consiste allora nella gestione del modello creato, modificando puntualmente le *mesh* e applicando una serie di filtri generali[40]. Il problema della modellazione numerica è infatti legato alle capacità di selezione dei punti della nuvola, composta anche da milioni di elementi. Si tratta fondamentalmente di operazioni pulizia[41], di analisi e di *smoothing* dei dati acquisiti, da effettuarsi con l'accortezza di non perdere informazioni e non compromettere la leggibilità del dato.

Per un corretto inquadramento metodologico è opportuno infine soffermarsi sul successivo *utilizzo dei dati* ottenuti con tali tecniche. L'automatizzazione del processo porta ad un modello numerico che innanzitutto deve essere puntualmente gestito e verificato. Creata questa nuvola di punti, è possibile avvalersene con approcci diversi: si può infatti vedere il dato digitale come un complesso e accurato insieme di misure nello spazio dal quale poi si possono estrapolare elementi significativi per un'interpretazione geometrica, oppure è possibile interpolare con una *mesh* i punti, magari integrandoli nel rilievo geometrico diversamente elaborato. La scelta è strettamente legata all'oggetto analizzato e agli obiettivi del rilievo, considerando che l'interpolazione di *mesh* crea un clone della realtà ignota come la realtà stessa, una condizione che



6. Modello del peduccio del pulpito esterno del Duomo di Perugia (Stefano Antoniaci, corso di Tecniche della Rappresentazione, Università degli Studi di Perugia, a.a. 2009-10).

deve essere chiaramente esplicitata nelle scelte progettuali del programma di rilievo. Seppure in determinate circostanze, come ad esempio nel caso di particolari scultorei, può essere opportuno concentrarsi sull'apparenza della forma per evitare un'improbabile interpretazione geometrica, in relazione agli obiettivi posti dal rilievo scientifico le operazioni di gestione del modello devono comunque essere principalmente puntuali, atte a garantire la correttezza della misura stimata, a scapito anche di un ingente lavoro di finitura.

L'*affidabilità* del dato diviene allora il nodo centrale della questione. Pertanto, seppur ancora poco dibattuto in ambito rappresentativo, per delimitare il campo di applicazione di tale tecnica nel rilievo d'architettura è necessario stabilire *criteri* base che relazionino l'accuratezza garantita con la



scala del rilievo. A tale scopo una prima regola può essere estrapolata partendo dalla rappresentazione dell'elemento minimo, nella fattispecie il *pixel*, ed ipotizzando che l'accuratezza del rilievo sia comunque minore dell'errore di graficismo, stabilito nel canonico spessore del segno di $\pm 0.1\text{mm}$. Si impone così l'errore ammissibile dal quale segue la scala del rilievo che può essere ricavata. Il massimo dettaglio garantito sarà infatti determinato dal rapporto fra le dimensioni reali dell'oggetto rilevato e il numero di *pixel*[42]. È opportuno far risaltare che così sono vincolate solamente le immagini generatrici e non tutto il sistema di operazioni che vengono effettuate dalla fotomodellazione, prettamente statistiche e pertanto segnate inevitabilmente da valori medi stimati. Inoltre non si considerano errori intrinseci dello strumento, dovuti alla deformazione delle lenti, alla differenza messa a fuoco, alla diversa apertura del diaframma, nonché in generale all'influenza dell'ambiente circostante che tanto incide sulla qualità dell'immagine stessa. Ciò comporta la necessità di imporre un fattore di sicurezza, che si propone, appoggiandosi e invertendo il criterio di affidabilità utilizzato in fotogrammetria[43], con un valore di $\sigma_A=4$, riduzione che ne circoscrive notevolmente l'utilizzo.

Si vuole proporre allora un secondo criterio più sperimentale, ricavabile dall'evidenziazione dei fattori che incidono nelle diverse fasi e capace di valutare non tanto la singola immagine, ma il processo stesso della fotomodellazione. Si vuole cercare di determinare un diverso e più accurato valore del fattore di sicurezza considerando i singoli elementi che interessano il processo, e ricavando $\sigma_B = \sum \sigma_i$. In particolare i diversi elementi che condizionano la misura, ipotizzando ancora una correttezza della metodologia di rilievo e condizioni accettabili del contorno, possono essere:

$\sigma_1 = 1.5$ = fattore intrinseco al processo probabilistico;
 $\sigma_2 = 0-2$ = parametro da assegnare in funzione delle condizioni di luce;

$\sigma_3 = 0-2$ = parametro da assegnare in funzione della riflettanza del materiale;
 $\sigma_4 = 0-1$ = parametro da assegnare in funzione della deformazione delle lenti e del tipo di obiettivo/camera;
 $\sigma_5 = 0-1$ = parametro da assegnare in funzione dell'accessibilità (se è possibile muoversi a 180° intorno all'oggetto);
 $\sigma_6 = 0-1$ = parametro da assegnare in funzione della posizione interna / esterna;
 $\sigma_7 = 0-2$ = parametro da assegnare in funzione dell'uniformità del modello.
 È importante ribadire che lo scopo del criterio sia di permettere l'autovalutazione dell'applicabilità della fotomodellazione nei determinati casi studio, dando riferimenti più che norme, lasciando così all'operatore quel margine di interpretazione che caratterizza sempre il rilievo d'architettura. Emergono, *in conclusione*, i limiti della fotomodellazione che si attesta principalmente come una tecnica capace di integrare le operazioni di rilevamento anche con ottimi risultati. Ciò si allinea con la tradizionale pratica del rilievo d'architettura, costantemente segnato da una scelta puntuale di soluzioni strumentali in funzione dell'obiettivo e dell'oggetto. Quando anche altre tecniche certamente più affidabili, come il *laser scanning*, si trovano in difficoltà o quando un'eterogeneità di dettagli porta a ricercare soluzioni di maggiore praticità nelle operazioni di rilevamento, la fotomodellazione, se le condizioni al contorno ne garantiscono una corretta applicazione, diviene una valida alternativa ed un ottimo strumento di integrazione.

La scala ottimale è allora il dettaglio architettonico, dove la nuvola di punti risolve le difficoltà della complessità formale delle soluzioni puntuali. Devono comunque essere valutate le condizioni ambientali di luce e i consequenziali problemi associati in particolare alla riflettanza[44] che può dissimulare le automatizzate corrispondenze fra i fotogrammi. Infine si può sottolineare il rapporto fra accuratezza e accessibilità, e come in proporzione alla vicinanza dell'osservatore sia possibile ricavare una nuvola

maggiormente affidabile con minori errori di rumore e deviazione.

La pratica e l'esperienza chiaramente giocano a favore del risultato finale. La complessità delle operazioni evidenziate in questa analisi e nel parallelo percorso delle immagini rappresentate[45] permettono di rimarcare come il modello numerico non si ottenga poi con minore fatica rispetto al disegno geometrico. Alla base c'è sempre un percorso di interpretazione dei dati, scelte che, seppur interessano parzialmente la presa, diventano decisive nella creazione della nuvola e durante le successive operazioni di finitura, dove è stato sottolineato il rischio di alterazione della misura[46], proprio però di qualsiasi rilievo[47].

Rispetto a programmi simili, i *software* liberi qui descritti impongono un'importante interpretazione statistica la cui affidabilità è testimoniata dai risultati, con i modelli configurati da centinaia di migliaia di punti[48]. Seppur non sia il compito del rilevatore addentrarsi sulle questioni inerenti la matematica posta alla base, la comprensione della logica utilizzata, e soprattutto l'esperienza maturata, portano a riporre fiducia, ed in parte speranza, sull'utilizzo della fotomodellazione. In definitiva la corretta domanda non è tanto se la fotomodellazione sia utile per il rilievo scientifico, ma quando sia opportuno adottare tale tecnica, e che cosa e come si possa ricavare con essa. Forse, se tali applicazioni riscuotono maggior successo fra gli esperti di *computer grafica* piuttosto che presso i rilevatori veri e propri, non è tanto per una sfiducia sul sistema procedurale, ma per le maggiori difficoltà di controllo dello strumento di interpretazione, non più la linea, ma la matematica statistica. E si sa che questa, forse perché non si conosce bene, non sempre piace.



MESH LAB



MODELLO



FOTOMODELLAZIONE

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PERUGIA
TECNICHE DELLA RAPPRESENTAZIONE
professore: ING. FABIO BIANCONI
studente: C. CARMEN SOMOGHI
a.a. 2009/2010

7. Modello del portale dell'ex Palazzo Sorbello a Perugia
(Carmen Somoghi, corso di Tecniche della Rappresentazione,

Università degli Studi di Perugia, a.a. 2009-10).

NOTE

[1] Il carattere innovativo della fotomodellazione è manifesto innanzitutto nel suo stesso termine che, ad oggi, alla fine del 2010, pare non sia ancora stato acquisito dalla lingua italiana, in quanto ad esempio nel vocabolario e nell'enciclopedia *online* della Treccani con tale parola non si ottiene alcun risultato. Anche il nuovo sapere enciclopedico di internet entra in difficoltà, con i motori di ricerca che danno esiti abbastanza limitati: su Google si hanno poco più di 700 link contro i 40.000 che si trovano con la parola "fotogrammetria". Una sorte simile è riservata anche al mondo anglosassone: nell'enciclopedia Britannica *online*, ricercando

"*photomodeling*" non si hanno risposte, mentre si assiste ad un diverso successo sui motori di ricerca, con ben 659.000 link, un dato estremamente positivo, decisamente falsato però dall'inclusione di molti riferimenti alla moda e non all'architettura, anche se con "*3D photomodeling*" si arriva comunque a 32.000 risultati, a dimostrazione dello sviluppo di tale tecnologia nel contesto culturale anglofono e in particolare in ambito informatico.

[2] Nell'ambito dello sviluppo delle tecniche di fotomodellazione, fra gli istituti di ricerca europei emerge l'attività scientifica sviluppata dal GAMSAU del CNRS di Marsiglia e dall'ISTI del CNR di Pisa.

[3] M. Thompson, H. Gruner, *Foundations of Photogrammetry, Manual of Photogrammetry*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, 1980, pp.1-36.

[4] La fotogrammetria monoscopica, ottenuta dalle comuni macchine fotografiche e dai raffronti fra i singoli fotogrammi puntualmente creati, si distingue dalla fotogrammetria stereoscopica caratterizzata invece da una particolare struttura delle camere di ripresa che simulano il sistema della percezione umana con la sua visione binoculare.

[5] Come è noto, la misura ottenuta con il *laser scanner*, a seconda delle tecnologie utilizzate, è frutto o del calcolo dei

tempi di percorrenza di un raggio laser dalla sua emissione al suo ritorno (tempo di volo) o della variazione di fase subita dal segnale nel suo tempo di percorrenza (variazione di fase).

[6] L'uso delle *reflex* è legato al controllo manuale della luce e alla struttura della macchina stessa, in particolare alle dimensioni del sensore che, a parità di *megapixel*, porta a qualità migliori dell'immagine soprattutto quando si sale nella gamma degli ISO, capace poi di ottimizzare l'errore di parallasse, il rumore delle immagini (*luminance noise*) e, con obiettivi opportuni, le deformazioni ottiche.

[7] In ambito commerciale si possono segnalare *EOS Photo-*

BIBLIOGRAFIA

Cignoni P., Corsini M., Ranzuglia G., *MeshLab: an Open-Source 3D Mesh Processing System*, in "ERCIM News 2008", 73.
Cundari C. (a cura di), *L'immagine nel rilievo. Atti del Seminario di studio*, Lerici, V-1988, Roma, II-1989, Gangemi, Roma, 1992.
Docci M., Maestri D., *Manuale di Rilevamento architettonico e Urbano*, Laterza, Roma-Bari 1994, p.105.
Migliari R. (a cura di), *Frontiere del rilievo. Dalla matita alle scansioni 3D*, Gangemi, Roma, 2001.
De Rubertis R., *Il disegno dell'architettura*, Carocci, Roma, 1994.
Thompson M., Gruner H., *Foundations of Photogrammetry, Manual of Photogrammetry*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, 1980.
Vergauwen M., Van Gool L.,

Web-based 3D reconstruction service, in "Machine Vision and Applications", 17, 2006.
Shashua A. et alii, *On Representation Theory in Computer Vision Problems. Technical Report 2002-4*, Leibniz Center for Research, School of Computer Science and Eng., The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, 2002.

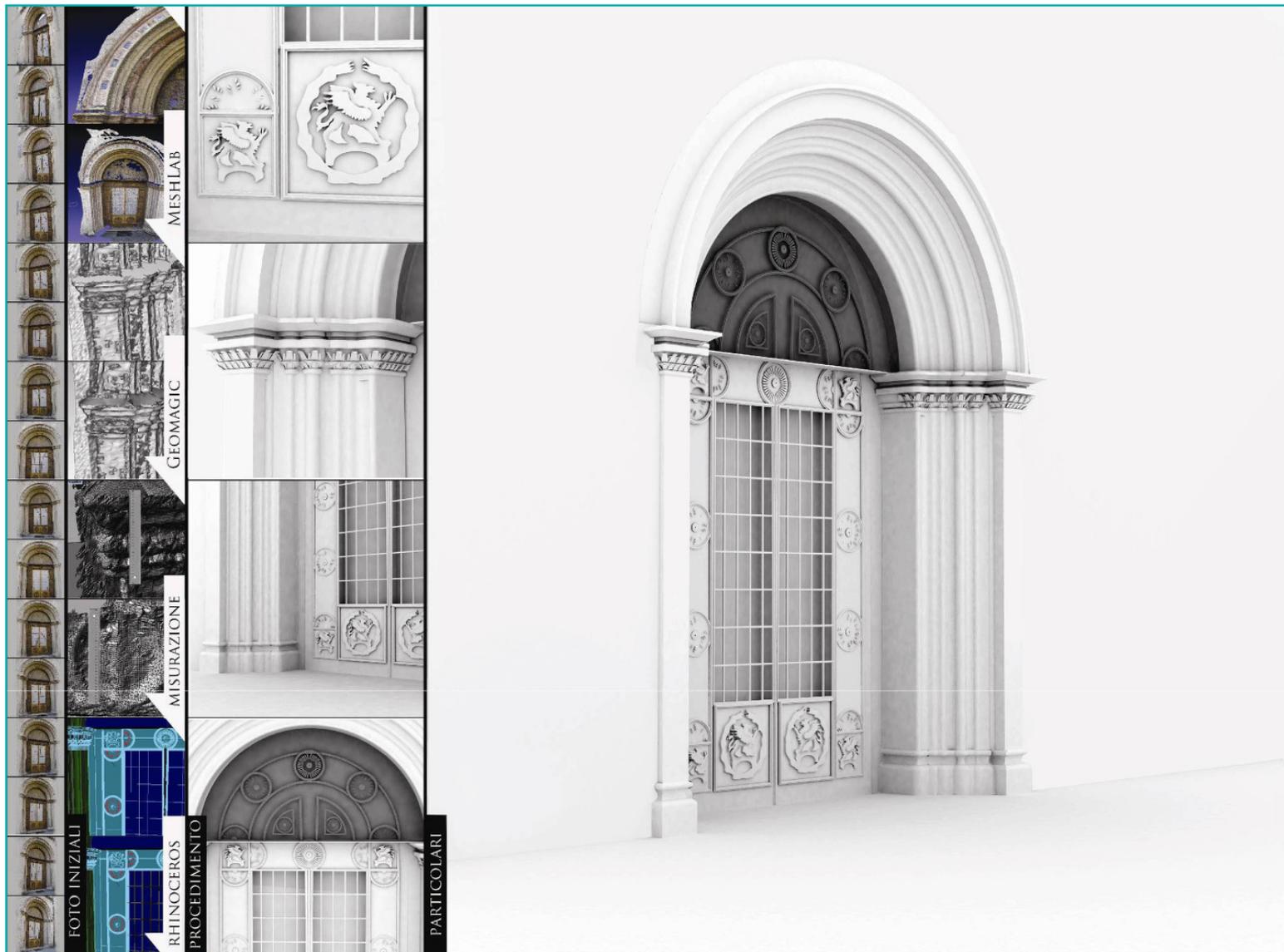
SITOGRAFIA

www.arc3d.be.
meshlab.sourceforge.net.
www.epoch-net.org.
www.itabc.cnr.it.
www.rilievoarcheologico.it.
www.map.archi.fr.
www.gnu.org.
www.opensource.org.
www.oasis-open.org.
mi.eng.cam.ac.uk.

modeler e, più in particolare, *Photomodeler Scanner* (www.photomodeler.com), basati su una precedente calibrazione della camera ed una manuale associazione dei punti corrispondenti, insieme ad *Autodesk ImageModeler* (www.autodesk.it) che cambia però nell'approccio perché ha come obiettivo misurare e generare scene tridimensionali usando fotografie, mentre *Topcon Imagemaster 3d* (www.terrageomatics.com) ha come scopo il rilievo ma si lega con maggiore accuratezza alla stazione totale della casa produttrice. Esiste poi una seconda classe di software che si basano su principi analoghi ma servono a creare foto "navigabili", simili ad ambienti tridimensionali, e fra questi si possono citare

Photosynth (photosynth.net) e *Photosculpt* (www.photosculpt.net). *Insight3d* (insight3d.sourceforge.net) e *Photo-to-3d* (www.photo-to-3d.com) sono invece *open source* che, per diverse ragioni, ad oggi appaiono meno congrui rispetto le finalità del rilevamento architettonico. È da tenere sotto osservazione quello che sarà il risultato dell'ormai prossimo connubio fra *Photosynth* e *MeshLab* che prospetta l'apertura di nuovi scenari.

[8] Le considerazioni che scaturiscono da questa analisi sono frutto dell'esperienza acquisita da chi scrive particolarmente in due momenti: nel percorso di formazione insito nelle attività di dottorato e nel successivo supporto



8. Modello del portale del Collegio del Cambio a Perugia (Gabriele Rinchi, corso di Tecniche della

Rappresentazione, Università degli Studi di Perugia, a.a. 2009-10).

alla didattica. In primo luogo il tema è stato presentato dal gruppo del CNR-ISTI di Pisa a Roma nell'ambito di *InnovTech for Archeo: Innovazione Tecnologica per l'Archeologia. Il rilievo e la rappresentazione digitale tridimensionale*, Roma, 12-13 Febbraio 2009. Da qui è iniziato uno studio autonomo, approfondito pragmaticamente nel rilevamento di Sant'Ivo alla Sapienza, esercitazione inserita nelle attività della scuola di Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo della "Sapienza" Università di Roma (XIV ciclo). Il caso studio ha permesso di verificare le potenzialità della fotomodellazione in un'esperienza formativa che aveva come scopo l'applicazione di differenti tecniche di rilievo. In questo contesto la fotomodellazione è stata sperimentata nel cortile esterno, scelta condizionata dall'impossibilità di avere foto ben bilanciate all'interno della chiesa a causa della disuniformità di luce e della posizione dei particolari più rilevanti posti ad un'altezza superiore ai venti metri. In funzione della scala richiesta, 1:50, e delle condizioni di accessibilità del sito, con la fotomodellazione sono stati rilevati con soddisfacente accuratezza porzioni del chiostro, parti dell'attico e i particolari scultorei del cortile. In questo modo sono stati risolti problemi di accessibilità, nel caso di modanature poste in porzioni del chiostro particolari, elementi il cui risultato numerico è stato puntualmente sezionato per essere interpretato con un modello geometrico. Nel caso invece di elementi scultorei, così presenti nel chiostro, poiché la loro genesi morfologica non è segnata tanto da scelte geometriche quanto da esigenze artistiche, si è preferito elaborare la nuvola di punti in un modello numerico puntualmente verificato. Il secondo

momento importante dello studio è stato il successivo supporto all'attività didattica, in particolare le esercitazioni del corso di Tecniche della Rappresentazione (a.a. 2009-10) presso l'Università degli Studi di Perugia, nella Facoltà di Ingegneria (corso di laurea in Ingegneria Edile-Architettura, prof. Fabio Bianconi), nonché all'interno del Master di II livello di "Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito storico e monumentale 2009-2010", nel Modulo di Rilievo dell'Architettura tenuto dal prof. Paolo Belardi. Si vuole pertanto ringraziare per il supporto e i consigli i docenti di riferimento della scuola di dottorato, il prof. Roberto del Rubertis, il prof. Laura del Carlo, la prof. Laura Carlevallis, il prof. Leonardo Paris; e i docenti della scuola di Perugia, il prof. Paolo Belardi e il prof. Fabio Bianconi. Si ringrazia infine per il supporto alla ricerca il prof. Paolo Cignoni, ricercatore presso l'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione (ISTI) del CNR di Pisa nonché sviluppatore di MeshLab.

[9] Bisogna sottolineare la differenza fra ARC3D e MeshLab: il primo è infatti un software libero, il secondo un *open source*. "L'espressione *software libero* si riferisce alla libertà dell'utente di eseguire, copiare, distribuire, studiare, cambiare e migliorare il *software*" (www.gnu.org), mentre l'*open source* è realizzato mediante l'applicazione di apposite licenze d'uso (www.opensource.org). In particolare ARC3D è un software *Web Service*, ovvero un sistema *software* che si lega ad un servizio web progettato per supportare l'interoperabilità tra diversi elaboratori su di una medesima rete (www.oasis-open.org).

[10] www.arc3d.be.

[11] meshlab.sourceforge.net.

[12] www.epoch-net.org.

[13] In ARC3D le operazioni di *upload* saranno semplicemente legate alla precedente identificazione del soggetto operante e del dato in creazione. Successivamente il programma richiederà il *subsample*, ovvero il ricampionamento delle immagini in percentuale, un'operazione che solitamente viene effettuata successivamente, per cui in tale fase pare opportuno lasciarlo al 100% se le immagini non sono troppo pesanti, altrimenti diminuirlo fino anche il 50%.

[14] ARC3D permette di determinare le immagini sfocate ed eliminarle in automatico prima della loro processazione attraverso la procedura di *Check blurry images*.

[15] Qualora l'oggetto da riprendere abbia una condizione tale da richiedere una presa a 360 gradi, l'esperienza suggerisce come sia meglio suddividere il percorso di presa in due semicirconferenze. In generale, da un punto di vista pratico, è buona norma effettuare fotografie prese ad un passo l'una dall'altra, formando genericamente una sequenza con un angolo fra le due visioni consequenziali necessariamente inferiore ai trenta gradi. Perdere chiaramente di significato effettuare ingrandimenti con *zoom* dalla stessa posizione o anche da punti diversi in quanto le immagini selezionate risulterebbero difficilmente confrontabili, come ugualmente si ha un risultato peggiore se si utilizza un cavalletto e ci si muove con uniformità in quanto si perderebbero le discontinuità dei dati necessarie alla calibrazione della macchina e al ritrovamento delle corrispondenze.

[16] L'automatismo così pre-

gnante nella logica procedurale stessa crea in realtà le maggiori diffidenze da parte di chi si occupa del rilievo scientifico, sia perché è impedita una puntuale verifica delle operazioni, sia per la mancata conoscenza delle procedure adottate.

[17] Il tema è ampiamente analizzato da testi specialistici che esulano dalle competenze e dalle finalità di questo studio. Fra tutti si può approfondire la questione in A. Shashua *et alii*, *On Representation Theory in Computer Vision Problems. Technical Report 2002-4*, Leibniz Center for Research, School of Computer Science and Eng., The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem 2002.

[18] M. Vergauwen, L. Van Gool, *Web-based 3D reconstruction service*, in "Machine Vision and Applications", 17 (2006), p.414.

[19] Le tecnologie che partono da un video non fanno altro che confrontare le *frame* sequenziali del filmato per trovare la corrispondenza fra punti. Da segnalare, fra gli altri, il nuovo software che si sta sviluppando presso la Cambridge University Qi Pan, chiamato "Proforma", *Probabilistic Feature-based On-line Rapid Model Acquisition*, nel quale il modello viene ricavato direttamente dalla webcam del PC in *real-time*.
Http://mi.eng.cam.ac.uk.

[20] M. Vergauwen, L. Van Gool, *op. cit.*, p.416.

[21] Tale principio, proprio della fotogrammetria classica, correla un punto sul piano immagine della prima foto ad una retta sul piano immagine della seconda foto, linea detta appunto *epipolare*, un'operazione che permette così di ri-

durare la ricerca della posizione tridimensionale vincolandola nell'unidimensionalità. Tutte le linee epipolari passano per un punto detto "epipolo", luogo in cui la congiungente dei due centri ottici (*baseline*) interseca il piano immagine.

[22] M. Vergauwen, L. Van Gool, *op. cit.*, p.416.

[23] Nel *parallel pipeline*, *server* differenti in modo autonomo valutano la corrispondenza fra punti, la mappa delle profondità e la posizione della camera.

[24] M. Vergauwen, L. Van Gool, *op. cit.*, p.417.

[25] Tale spiegazione giustifica la presenza di fotografie con filtri e a bassa risoluzione all'interno del *file* zippato che viene rinviato dal *server* che processa le immagini. Si comprende allora come già una prima interpretazione statistica sia determinata dall'interpolazione dei *pixel* di ciascuna immagine, con l'attributo di ciascun elemento che è determinato dalla media di un intorno maggiore anche più di 20 volte.

[26] Nella fattispecie viene utilizzato un algoritmo della classe dei *Geometric Robust Information Criterion* (M. Vergauwen, L. Van Gool, *op. cit.*, p.417).

[27] Ivi, pp.417-421.

[28] Il *dense matching* proprio delle *texture* del modello rispecchia difficoltà similari a quelle incontrate nella ricostruzione geometrica: individuate le corrette corrispondenze, si tratta sempre di definire per ciascun elemento della matrice *raster* un attributo valutato con metodi statistici, nel caso particolare, data la mancata sequenzialità

delle immagini, attraverso un criterio di stima legato alla multivisione stereoscopica (Ivi, pp.422-423).

[29] MeshLab è un programma che oltre a garantire la creazione della nuvola, permette di importare ed esportare nei principali formati della modellazione numerica (PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, COLLADA, PTX, X3D, VRML).

[30] In prima istanza parrebbe pertanto opportuno lasciare il valore del sottocampionamento al suo massimo livello, all'unità. In realtà, poiché le camere acquisiscono anche 10 milioni di *pixel*, il modello generato al massimo della sua definizione avrà un dettaglio bidimensionale al quale però deve essere associato puntualmente un corrispondente attributo di profondità. Segue l'impossibilità di giungere alla stessa accuratezza nel valore spaziale di ogni singolo *pixel*, e poiché l'informazione risulterà comunque affetta dall'errore massimo di ogni singolo *range*, è opportuno attuare il sottocampionamento per avere informazioni uniformi.

[31] Bisogna fare attenzione che già la geometria e le corrispondenze sono state valutate per ciascuna immagine e ciò che quindi viene selezionato è l'affidabilità dei valori spaziali precedentemente stimati. Anche in questo caso si potrebbe pensare che settare un valore elevato porti alla creazione di un modello migliore. In realtà la selettività così impostata esclude una serie di informazioni così che il modello risulterà affetto da "buchi". Anche in questo caso "*in medio stat virtus*" così che bisogna bilanciare correttamente il parametro in funzione dei dati a disposizione.

[32] Dal punto di vista pratico

una *preview* dominata dal blu scuro evidenzia la probabile affidabilità del dato di partenza, mentre la prevalenza di toni rossi e gialli anticipa il probabile insuccesso nella creazione del modello. Per quanto molto intuitiva, deve però essere letta con criterio, ipotizzando la corretta presa dei fotogrammi. Rappresentando infatti la corrispondenza fra punti, se le immagini sono prese da un'angolazione simile, è chiaro che il *software* troverà diversi punti comuni, ma probabilmente non riuscirà a valutare una corretta stima del dato proiettivo.

[33] Da questo elenco di immagini, è opportuno scegliere almeno una come *texture*, probabilmente quella che meglio comprende tutto il modello, forse quella che la *preview* mostra come più significativa. È possibile prendere anche diverse fotografie, da più angolazioni, in modo tale da trovare un attributo per tutti i lati dell'oggetto, ma è necessaria una limitazione determinata dalle potenzialità del programma il quale, se costretto a calcolare troppi dati, può andare in *crash*. Inoltre bisogna stare attenti all'uniformità della luce nelle diverse immagini selezionate la cui differenza altrimenti produce un cattivo effetto per la mescolanza della *texture*.

[34] Gli strumenti di selezione della maschera sono simili alla penna di qualsiasi programma di fotoritocco e al secchiello, attivabile selezionando con il tasto di *shift*.

[35] Con un certo paradosso rispetto al rilievo tradizionale manuale, con le tecniche di rilevamento passivo le superfici che si presentano come le più complesse da gestire sono quelle piatte e uniformi, per l'assenza di punti di riferimen-

to, e quelle traslucide e levigate dove la variazione di riflessione della luce crea nelle immagini trasformazioni cromatiche che inficiano il ritrovamento delle corrispondenze al momento del confronto.

[36] La pratica consiglia di tenere il *minimum angle* appena sotto i 90 gradi, al valore massimo, per evitare una selezione troppo rigorosa degli elementi.

[37] Il problema dell'ammorbimento delle forme è in generale molto sentito ed interessa quasi tutti i modelli numerici. Nel rilievo la logica statistica porta inevitabilmente ad errori nella stima della posizione del punto che, seppur minimi, creano un certo movimento della superficie che deve essere uniformata. D'altro canto bisogna fare attenzione a quei modelli inaspettatamente caratterizzati da una serie di piccole cuspidi, frutto prevalentemente o della riflettenza o di immagini generatrici leggermente sfocate.

[38] È da segnalare che valori massimi del *fast merge* spesso non danno risultati, valori minimi portano ad errori inaccettabili.

[39] Una volta definito il modello, sarà possibile effettuare velocemente il *reload* per tornare al settaggio dei parametri.

[40] MeshLab permette gran parte di queste applicazioni, le stesse che in definitiva interessano i modelli numerici ricavati dalla nuvola di punti prodotta dalla scansione laser. Esistono quindi programmi simili, per alcuni sensi anche più prestanti come i commerciali Geomagic o RapidForm. I processi logici sono fondamentalmente simili, genericamente poi alla fine l'*output* sarà un modello numerico

che dovrà essere importato nell'ambiente del software con il quale si modella il contesto architettonico di riferimento.

[41] Per pulizia, oltre che *remeshing*, semplificazione e ricostruzione, si intende anche la definizione di un modello omogeneo, in particolare l'eliminare le cuspidi e il chiudere i fori (*close holes*) che inevitabilmente si verranno a formare, così come è poi possibile processare il colore delle *mesh* ottenuto sempre per interpolazione.

[42] Se ad esempio un'immagine di 8 *megapixel* (3455x2303 *pixel*) rappresenta un oggetto di 3.00x2.00m, ipotizzando un completo sfruttamento del fotogramma e considerando, a ragione di sicurezza, la dimensione maggiormente scoriata, si ha una corrispondenza di circa un *pixel* al millimetro, che, rapportato all'errore ammissibile, stabilisce la garanzia di accuratezza ad una scala 1:5.

[43] M. Docci, D. Maestri, *Manuale di Rilevamento architettonico e Urbano*, Laterza, Roma-Bari 1994, p.105.

[44] Per 'radianza' si intende il rapporto fra l'intensità del flusso radiante riflesso e l'intensità del flusso radiante incidente che varia con la posizione dell'osservatore. In tal modo, poiché il computer non valuta certo la geometria ma solo la differenza di attributo dell'elemento matriciale posto in corrispondenza, materiali segnati da forte riflettenza (come il caso iperbolico di uno specchio) creano problemi al percorso di fotomodellazione.

[45] In parallelo al testo, il percorso quasi autonomo delle figure vuole mettere in evidenza le determinate prerogative della rappresentazione dei dati ricavati con la fotomodel-

lazione, interpretata pertanto come tecnica per la misurazione piuttosto che come azione di rilevamento a se stante. In Figura 1, la nuvola di punti creata automaticamente da MeshLab con i dati provenienti da ARC3D, evidenzia l'accuratezza di questa procedura. La Figura 2 evidenzia invece come la *texture*, seppur simili con eccellente attenzione le reali fattezze dell'oggetto, nasconde un modello comunque affetto da errori, particolarmente evidenti se ricercati nei coni d'ombra piuttosto che su visioni corrispondenti ai punti di presa. Inoltre la nuvola di *pixel* esplicita la difficoltà di trovare corrispondenze per gli elementi uniformi, con la sottostante cornice che risulta infatti scabra e imperfetta. Segue l'esigenza di estrapolare dalla nuvola l'oggetto scultoreo non modellabile con logiche geometriche, ricavando poi, dalla sezione della cornice con un piano ad esso perpendicolare, il profilo della modanatura, spezzata facilmente interpretabile con gli strumenti del disegno digitale. In Figura 3 si evince la potenzialità in termini di misurazione della fotomodellazione che, a partire da immagini più ampie, garantisce comunque l'estrapolazione di un particolare prettamente corrispondente con il reale. È stata evidenziata poi l'immagine principale che ARC3D segnala e rielabora con filtri che servono a far emergere determinate prerogative utili ad un corretto confronto degli attributi digitali. In Figura 4 è stato infine rappresentato il percorso che ha permesso la modellazione della fontana d'angolo, le foto di partenza, il mascherone in forma di nuvola di punti di *mesh* con *texture*, infine il successivo inserimento in un modello geometrico. Nel particolare è da notare il rumore provocato dalla rifrazione della tubatura in ottone e il successivo errore

nella triangolazione automatizzata. Le successive immagini sono il risultato dell'esperienza didattica. Eugenio Bini, per rappresentare la formella riportata in Figura 5, ha preferito lavorare sulla nuvola di *pixel* con piccoli accorgimenti puntuali e principalmente con filtri di *smoothing* attentamente calibrati utili a determinare un ottimo risultato formale. Per elaborare la Figura 6, Stefano Antoniacci ha scelto un oggetto intelligentemente caratterizzato da una pressoché assenza di coni d'ombra, da una facile accessibilità e da una variazione morfologica e cromatica. Il risultato è pertanto garantito dalla congruenza fra la tecnica di misurazione e il contesto, modello poi esportato nell'ambiente di Rhinoceros al fine di effettuare un *render* simile alla realtà stessa. La Figura 7 è stata elaborata da Carmen Somoghi. Il suo faticoso lavoro probabilmente può non essere apprezzato nella semplice immagine, il passaggio dalla risposta di MeshLab (a destra) al modello numerico (a sinistra) può sembrare peggiorativo, invece, se si analizzasse nel dettaglio la nuvola di punti finale, si noterebbe una puntuale pulizia ed una correttezza del dato che è stato reso continuo ed uniforme da un lavoro quasi certosino. L'ultimo elaborato di Gabriele Rinchi, riportato in Figura 8, pone l'accento su una differente logica di modellazione: la nuvola di punti, che in realtà si esplicita parzialmente incompleta o comunque con errori difficilmente risolvibili, è stata utilizzata per prendere le misure e ricavare le sezioni caratterizzanti l'oggetto, rilievo veloce e globale, effettuato con semplici foto, ma capace comunque di fornire quei dati utili all'interpretazione geometrica.

[46] Dal punto di vista pratico è opportuno visualizzare il mo-

dello senza *texture* che invece dissimulano le trasformazioni sui dati. Ad esempio all'aspettare dello *smooth* si ha un aspetto percettivo sempre migliore, anche se in realtà i dati sono irrimediabilmente smussati e deformati. Operativamente, non essendo patrimonio della cultura del rilievo la conoscenza profonda degli algoritmi utilizzati, è sempre consigliabile utilizzare funzioni che presentino una *preview*. È opportuno poi fare attenzione ai coni visivi e pertanto analizzare il modello in particolare dai punti di vista diversi da quelli della presa fotografica per poter così individuare le eventuali imperfezioni determinate nella triangolazione automatica. In tali casi è consigliato allora il ridisegno dei singoli contorni, partendo dall'eliminazione dei triangoli sbagliati ed indirizzando manualmente la chiusura dei fori imponendo anche solo alcune connessioni certe.

[47] Seppur bisogna considerare il valore probabilistico di tali operazioni, al contempo si può avere fiducia in tale scienza poiché in definitiva la variabilità interessa qualsiasi pratica di rilevamento, dalla fase di misurazione del dato alla sua interpretazione.

[48] Nella nuvola di punti creata, seppur la quantità di dati riportati non facilita le scelte selettive del rilievo, si hanno risultati dal punto di vista probabilistico più corrispondenti al reale rispetto ai modelli geometrici che inevitabilmente, nella loro interpretazione, non considerano un numero maggiore di punti rilevati. Sarà affidato alla successiva selezione e interpretazione del rilievo la scelta delle corrette geometrie con le quali creare poi il modello.