



Fabio Remondino

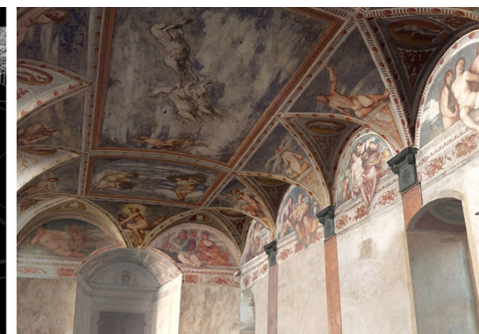
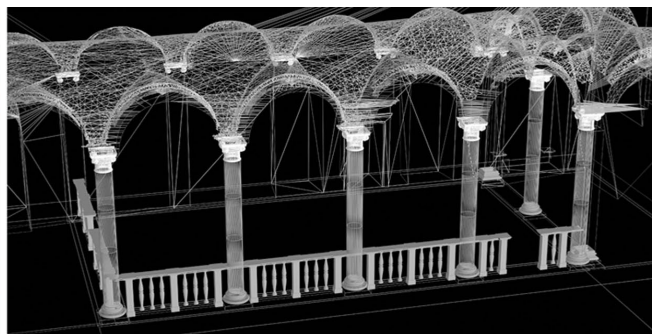
Laureato nel 1998 in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio presso il Politecnico di Milano. Dottore di ricerca in Fotogrammetria e Telerilevamento al Politecnico Federale di Zurigo (ETH). E' stato docente presso l'ETH dal 2004 al 2008 e dal 2008, attualmente è ricercatore presso la Fondazione Bruno Kessler di Trento dove dirige l'unità di ricerca 3D Optical Metrology. Autore di oltre 80 pubblicazioni scientifiche in giornali e conferenze internazionali, ha organizzato 9 conferenze scientifiche e 6 summerschools.

Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse *3D surveying and modelling of complex architectural sites and heritage objects*

Le moderne tecniche e metodologie di rilievo digitale 3D consentono la documentazione, conservazione e rappresentazione digitale di siti e architetture con risultati straordinari dai punti di vista geometrico e visivo. Attualmente abbiamo a nostra disposizione una vasta gamma di sensori e tecnologie per rilevare dati geometrici, processarli, derivarne informazioni metriche 2D/3D dettagliate, accurate e infine renderle disponibili attraverso basi di dati online o sistemi GIS. L'articolo presenta le attuali tecniche di rilievo per la modellazione 3D di siti culturali e architetture complesse. Esempi e problematiche sono riportati con lo scopo di valutare criticamente lo stato attuale del rilievo 3D, le potenzialità e i possibili sviluppi futuri.

The actual techniques and methodologies for 3D surveying and modeling allow to achieve very satisfactory and impressive results in the field of documentation, conservation and representation of architectural sites and heritage objects. A great variety of active or passive sensors are available for data acquisition. These data are then processed in order to derive metric 3D information and share them using online databases or GIS tools. But despite the large amount of data, the processing methodologies are still relying very often on manual restitution as automatic methods are still not enough reliable for the detailed and precise 3D reconstruction of architectural scenarios and drawings. The article reports the actual 3D surveying methodologies and data processing techniques with a critical description of open problems and research issues.

1. Strutture architettoniche complesse rilevate e modellate in 3D con tecniche digitali fotogrammetriche e laser scanner 3D.



INTRODUZIONE

Il rilievo digitale e la creazione di modelli tridimensionali (3D) di oggetti e scene complesse (Fig. 1) ha riscontrato negli ultimi anni molto interesse da parte della comunità scientifica e del settore commerciale. Grazie agli sviluppi nel campo della sensoristica è infatti possibile acquisire grandi quantità di dati spaziali, geo-referenziarli e derivarne informazioni 3D in maniera abbastanza semplice. Si sta assistendo sempre più a restituzioni virtuali con ambientazioni e visualizzazioni 3D prodotte per varie applicazioni quali la documentazione, conservazione, restauro virtuale, simulazione, didattica, animazione, cartografia, gestione territoriale (GIS), monitoraggio, ecc. Uno degli esempi più appropriati è Google Earth, che associa mappe e immagini satellitari a modelli tridimensionali di territorio, città o singoli edifici, dimostrando a utenti anche non esperti le potenzialità delle geo-tecnologie e degli strumenti digitali di rilievo 3D oggi disponibili. L'utilizzo di metodologie di rilievo digitale nel settore cartografico è ormai diventato da diversi anni uno standard anche a livello produttivo. Nel campo architettonico e archeologico il rilievo ha subito solo nell'ultimo decennio un cambiamento, dovuto principalmente alla capacità di restituire modelli digitali tridimensionali senza contatto e con grande accuratezza. Esiste una linea metodologica chiaramente definita lungo la quale negli ultimi anni l'implementazione di tecniche di fotogrammetria e

laser scanner ha raggiunto i caratteri di un sistema maturo e stabile. Ciò ha determinato l'aumento di tecniche di modellazione 3D come pratiche di lavoro su edifici storici e artefatti archeologici e il consolidamento di una metodologia del processo di creazione di modelli 3D a partire da scene reali che presenta ormai passaggi ben definiti e chiari. Nei successivi paragrafi le tecniche di rilievo e modellazione digitale verranno brevemente descritte con esempi e casi di studio nel settore della documentazione del patrimonio culturale e rappresentazione architettonica. Verranno inoltre presentate alcune considerazioni e linee di ricerca su problemi aperti nel campo della modellazione 3D.

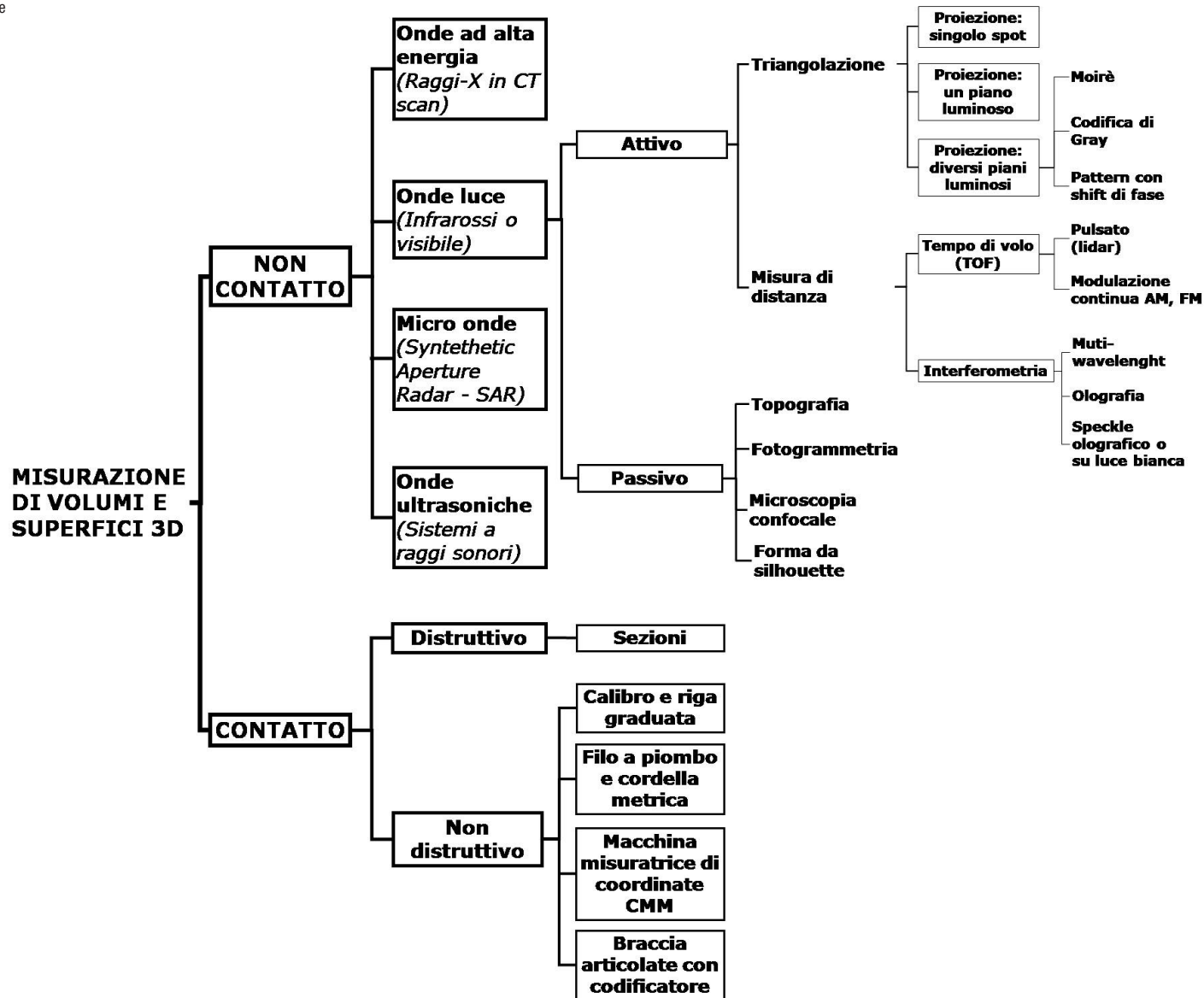
TECNICHE E METODOLOGIE DI RILIEVO 3D

Strumenti e tecniche di rilievo sono normalmente classificate in base al loro principio di funzionamento e se comportano o meno un contatto fisico tra l'oggetto da misurare e lo strumento di misura (Fig. 2). Le tecniche di rilievo senza contatto sono ovviamente le più ricercate, soprattutto nel settore dei beni culturali o per grandi strutture e siti (Remondino, 2011). Poiché restituiscono la realtà come si presenta al momento del rilievo, queste tecniche sono anche dette *reality-based* e si possono classificare in:

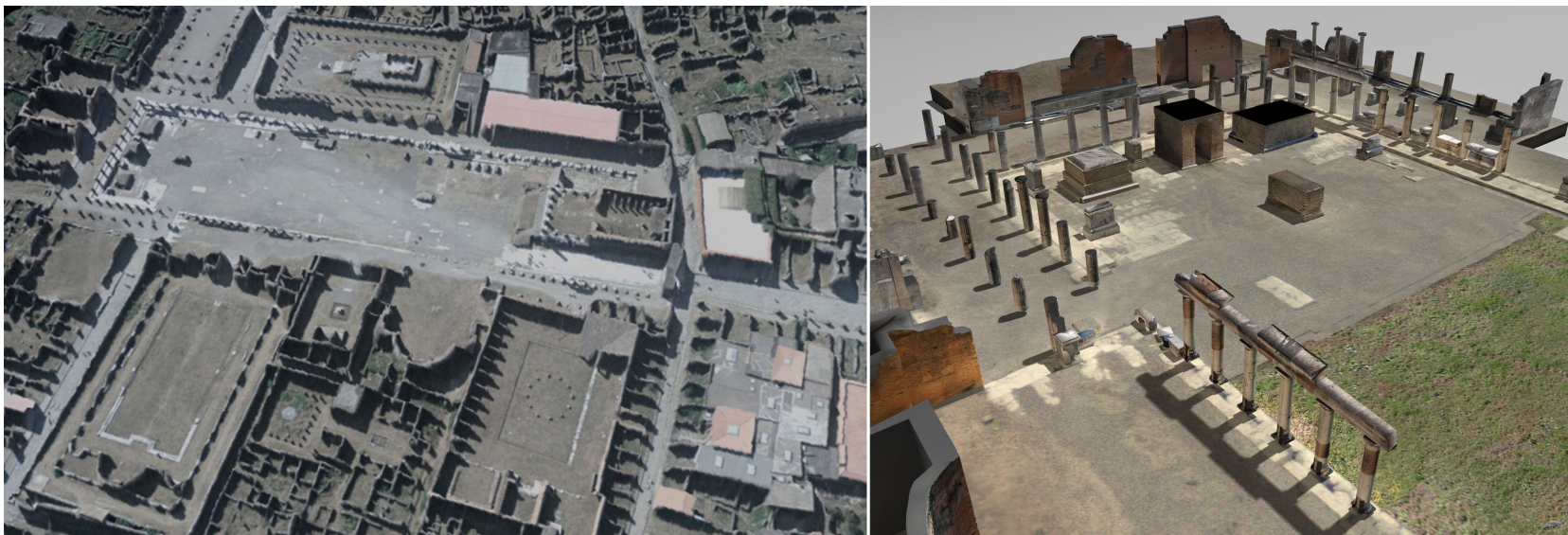
1) Tecniche basate su sensori passivi (metodi *image-based*) (Remondino & El-Hakim, 2006): esse sfruttano la luce presente nell'ambiente per acqui-

sire immagini da elaborare successivamente per derivarne informazioni 3D della scena osservata. Tra queste tecniche, la fotogrammetria (Mikhail et al., 2001; Luhmann et al., 2006) è quella più conosciuta ed utilizzata per rilievi cartografici, architettonici, industriali e archeologici, con la precisione e affidabilità dei risultati come obiettivo primario della restituzione 3D. Una tecnica simile è la *computer vision* (Hartley & Zisserman, 2004) che però ha come scopo primario l'automazione dell'intero processo di restituzione da immagini, riducendo quindi l'accuratezza metrica dei risultati ottenuti. Attualmente il principale vantaggio dei sistemi passivi e delle relative tecniche di elaborazione d'immagini risiede nel costo e nella trasportabilità dei sensori (soprattutto nel caso terrestre) nonché nel fatto che le immagini sono sempre reperibili in archivi storici o banche dati (Gruen et al., 2004). Le immagini possono essere acquisite da sensori montati su satelliti (Ikonos, World-View, Spot, Geo-Eye, ecc.), aeree, droni (o più genericamente UAV) o con camere digitali terrestri (compatte o reflex). Recentemente i droni hanno avuto un forte successo e sviluppo, sia nel campo archeologico che architettonico, permettendo di acquisire immagini nadirali o oblique con bassi costi e discreta affidabilità di acquisizione. Una grande esperienza è comunque richiesta nell'acquisire e processare le immagini e questo ha portato molti utenti all'uso di strumentazione ottica attiva (laser scanner).

2. Strumenti e tecniche per rilievi e misure 3D.



3. Rilievo e modellazione 3D del Foro di Pompei dove sono stati integrati dati fotogrammetrici con dati da scanner 3D (Guidi et al., 2009).



2) Tecniche basate su sensori attivi (metodi *range-based*) (Vosselman & Maas, 2010): esse impiegano strumenti che emettono un segnale elettromagnetico (nel campo del visibile, infrarosso, raggi X, ecc.) che viene poi registrato dallo strumento al fine di derivarne una misura di distanza (*range*). Strumenti *range-based* sono i laser scanner (terrestri o aerei), le stazioni totali, i GNSS, i radar, ecc. Nel campo architettonico e dei beni culturali, i laser scanner (a triangolazioni o tempo di volo) e i sistemi a luce strutturata hanno riscontrato un grande successo e hanno notevolmente aumentato la facilità con la quale possono essere acquisiti i dati formali relativi a semplici oggetti o ad ampie strutture. I sensori attivi sono in grado di fornire direttamente e in poco tempo grandi moli di dati 3D, restituendoli sotto forma di nuvola di punti non strutturata e densa. L'elevato numero di informazione non strutturata richiede però lunghi tempi di editing per estrarne

gli elementi geometrici più significativi della scena o crearne un modello geometrico poligonale. Uno svantaggio è anche il fatto di dover sempre predisporre delle acquisizioni fotografiche separate in quanto le foto-camere normalmente montate sugli strumenti attivi sono di bassa qualità. Inoltre i sensori attivi sono generalmente progettati per uno specifico campo di utilizzo, pertanto per lavorare in un determinato raggio d'impiego. Infine costi, problemi di trasportabilità o problemi nel rilievo di spigoli possono spesso limitarne l'impiego in particolari missioni di lavoro. Altre tecniche di rilievo *reality-based* includono le stazioni totali o i GNSS (GPS, Galileo, Glonass), anche se questi approcci non sono applicabili su grandi siti, richiedono lunghi tempi di acquisizione e sono ormai superati. Ciò detto, una metodologia di rilievo e modellazione 3D il più delle volte viene studiata combinando

diverse tecniche, cercando di sfruttare i vantaggi e sopperire agli eventuali limiti di ciascuna singola tecnica. Infatti, al momento, non esiste una singola tecnica di rilievo portatile e flessibile, in grado di fornire, allo stesso tempo, risultati accurati con costi contenuti e in tempi rapidi. Pertanto l'integrazione di diverse tecniche di rilievo viene generalmente adottata per rilevare siti molto estesi e complessi (El-Hakim et al., 2007; Stamos et al., 2008; Guidi et al., 2009) (Fig. 3). La scelta della tecnica migliore o della metodologia d'integrazione dipende da molti fattori, tra cui l'esperienza, il tipo di oggetto o scena da rilevare, il materiale, lo scopo del rilievo, il dettaglio geometrico richiesto, il budget del progetto, ecc. Identificare il migliore approccio è la prima e fondamentale fase per riuscire a ottenere gli obiettivi prefissati. Spesso un rilievo 3D viene eseguito con strumentazione laser scanner perché, benché

4. Esempi di strutture architettoniche ricostruite con tecniche fotogrammetriche automatiche. Le nuvole di punti dense, accurate e dettagliate possono poi essere impiegate per creare fotopiani o disegni. (<http://www.tapenade.gamsau.archi.fr>).



costosa, generalmente difficile da trasportare e senza un buon sistema per acquisire immagini ad alta risoluzione, non presenta grandi difficoltà nel rilievo di dati geometrici. Ma i recenti sviluppi nel campo della correlazione automatica d'immagini hanno mostrato come sia possibile restituire in 3D, con precisioni molto elevate, anche forme geometriche complesse e dettagliate partendo da dati di immagini.

LA FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria (Mikhail et al., 2001; Luhmann et al., 2006) è la scienza che consente di ottenere misure e ricostruzioni 3D accurate da fotografie (immagini). Partendo da punti omologhi individuati nelle immagini, la tecnica fotogrammetrica consente di determinare informazioni metriche sulle dimensioni, forma e posizione di un oggetto o scena. La fotogrammetria pertanto stabilisce una

relazione geometrica fra le immagini e la scena reale al momento della ripresa fotografica. Una volta ricostruita questa relazione mediante l'utilizzo del modello matematico della collinearità, è possibile ottenere informazioni metriche e 3D sull'oggetto attraverso l'impiego di almeno due immagini. In fotogrammetria, analogamente a quanto avviene nella visione umana, se un oggetto viene ripreso con almeno due immagini scattate da punti di vista differenti, le diverse posizioni dell'oggetto nelle immagini consentono di ottenere viste stereoscopiche e derivare informazioni 3D dalle aree di sovrapposizione nelle immagini.

La fotogrammetria è utilizzata in molti campi, dal tradizionale impiego catastale e industriale ai video giochi, alle produzioni cinematografiche, alla documentazione del patrimonio culturale sino al campo medico. La fotogrammetria è per tradizione considerata come una procedura lunga, manuale

e ormai obsoleta, soprattutto dopo l'avvento dei laser scanner 3D. Ma i recenti sviluppi informatici di questa tecnologia ne hanno aumentato le prestazioni e automatizzato molte procedure di restituzione, riportandola come tecnica fondamentale anche per il rilievo archeologico e architettonico (Fig. 4).

Paragonata ad altre tecniche *image-based* (*computer vision, shape from shading, shape from texture*, ecc.), la fotogrammetria non mira ad una completa automazione delle procedure di restituzione, ma ha come obiettivo primario l'acquisizione di informazioni metriche, accurate (precise e affidabili) e dettagliate dal punto di vista geometrico. Attualmente, per la restituzione di un modello completo, preciso e dettagliato, con elementi geometrici ben definiti, l'intervento manuale di un utente è ancora necessario. Infatti le principali geometrie possono essere restituite misurando pochi punti

e impiegando delle primitive predefinite (Fig. 5). Nel caso di oggetti *free-form*, come basso-rilievi o statue, procedure automatiche (*image matching*) vengono preferite in quanto in grado di estrarre un grande numero di corrispondenze (e quindi punti in 3D) necessarie a restituire la scena con tutti i suoi dettagli geometrici. Tecniche fotogrammetriche automatiche in grado di restituire prodotti metrici e accurati sono ancora in via di sviluppo ma i risultati attuali testimoniano le grandi potenzialità del metodo per derivarne informazioni 3D (nuvole di punti) alle diverse scale, paragonabili a quelle ottenute con sensori ottici attivi (Remondino et al., 2008; Vu et al., 2009; Pierrot-Deseilligny et al., 2011). Se l'obiettivo è invece quello di creare un modello 3D poco accurato, da utilizzare per semplici visualizzazioni o per applicazioni di realtà virtuale, sono disponibili diversi applicativi (anche *web-based*) basati su algoritmi di *structure-from-motion* (Arc3D, Microsoft Photosynth, Autodesk Photofly, ecc.).

Rispetto ai sensori attivi, i rilievi fotogrammetrici utilizzano immagini che contengono tutte le informazioni (geometria e tessitura) utili alla creazione di modelli 3D foto-realistici. Una volta acquisite le immagini, l'intero flusso di lavoro per derivare informazioni metriche e 3D di una scena consiste in:

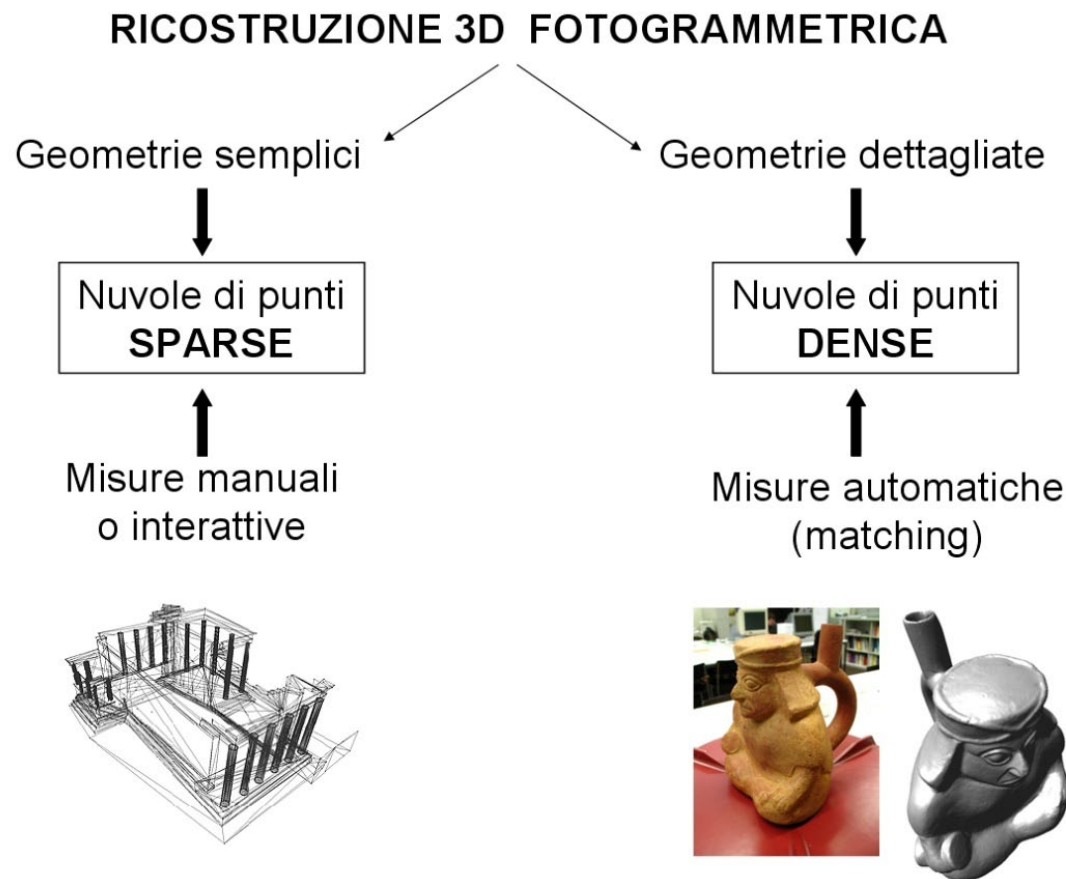
- calibrazione della camera (o sensore) per determinarne l'orientamento interno;
- triangolazione delle immagini per determinarne l'orientamento esterno;
- restituzione 3D della scena per derivare una nuvola di punti non strutturata sparsa o densa;
- creazione di un modello poligonale geometrico strutturato (mesh o TIN);
- tessitura del modello geometrico e produzione di un orthofoto.

SENSORI OTTICI ATTIVI

Un sensore ottico attivo misura fondamentalmente distanze (sensore *range-based*) ed è in grado di restituire direttamente un grande numero di coordinate 3D della superficie misurata (Vosselman & Maas, 2010). I sensori ottici attivi più impiegati in architettura e nel settore dei beni culturali sono i laser scanner (terrestri o aerei) e i sistemi a proiezione di frange (o luce strutturata). Questi

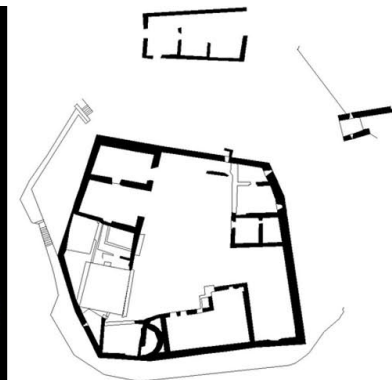
strumenti di misura sono costituiti da un emittore di luce e da un sensore che registra la risposta della luce laser sulla superficie che viene illuminata. La forma di luce che per prima ha consentito di creare uno scanner 3D è la luce laser che grazie alle sue proprietà fisiche permette di generare spot luminosi estremamente focalizzati su intervalli di distanza anche elevati. Una distinzione importante è legata alla tipologia di emissione e proiezione della luce, che può essere un singolo spot laser,

una lama di luce laser in movimento o un pattern di luce proiettato a risoluzioni diverse. La misura 3D è basata sul principio della triangolazione o sulla misura del tempo di volo. Mentre i sensori a triangolazione vengono utilizzati strettamente per applicazioni terrestri, data la limitata distanza di lavoro, i sensori basati sul principio del tempo di volo possono essere impiegati sia per applicazioni terrestri che aeree, in particolare per il rilievo del territorio (DTM/DSM). La differenza so-



5. Restituzione fotogrammetrica basata su approcci interattivi o automatici per ricostruire in 3D oggetti con geometrie semplici o complesse.

6. Esempio di strutture complesse modellate in 3D con strumenti a scansione TOF al fine di produrre mappe e materiale per restauro e conservazione.



stanziale è che nel primo caso non è necessaria la presenza di un sistema inerziale di posizionamento (GNSS/INS), indispensabile invece sull'aereo. I sistemi a scansione basati sul principio del tempo di volo (terrestri o aerei) sono in grado di rilevare oggetti anche a qualche chilometro di distanza e generare un campo di presa sferico. Per contro, questi strumenti raggiungono in generale una risoluzione e precisione superiore al millimetro, ovviamente in funzione della distanza strumento-superficie. (fig. 6). Gli strumenti a triangolazione, oltre all'estrema rapidità di acquisizione del dato 3D (nuvola di punti o *range map*), hanno risoluzione e precisioni che possono arrivare alla decina di micron. La risoluzione (massima) di uno strumento ottico attivo consiste in generale nella più piccola variazione del misurando che può essere misurata. Tale variazione è definita dal minimo passo di campionamento spaziale utilizzabile o, in altri termini, dalla massima capacità di catturare i dettagli di una superficie, dipendente a sua volta dall'insieme delle qualità ottiche, meccaniche ed elettroniche dello strumento.

Il flusso di lavoro per produrre modelli 3D con sensori attivi consiste in (Guidi et al., 2010):

- acquisizione di diverse nuvole di punti o *range-*

map al fine di rilevare tutta la scena in esame;

- registrazione e allineamento dei dati in un unico sistema di riferimento;
- riduzione di rumore, errori e dati nelle zone di sovrapposizione;
- creazione di un modello poligonale strutturato;
- registrazione di dati immagine al modello geometrico.

CONSIDERAZIONI FINALI

Le attuali tecniche di rilievo digitale tridimensionale sono caratterizzate da un livello di complessità decisamente superiore alla maggior parte dei metodi di rilievo diretto attualmente utilizzati nel campo architettonico e archeologico. Questa difficoltà, legata principalmente all'utilizzo e alla gestione delle informazioni 3D, è però compensata dalla grande potenzialità di queste tecniche, che permettono di ottenere informazioni geometriche e colorimetriche molto più complete di quelle accessibili attraverso le tradizionali tecniche di rilievo, con tempistiche decisamente inferiori e con un grado di accuratezza decisamente superiore. L'applicazione di queste tecniche e metodologie permette di generare copie digitali dei modelli reali con una tolleranza relativa al dato reale dipendente

dal tipo di strumento e dal metodo di restituzione scelto. I modelli digitali sono poi alla base dei successivi trattamenti e prodotti, quali orthofoto, GIS, rappresentazioni vettoriali, animazioni, interpretazioni, ecc.

Le tecnologie o metodologie di rilievo e modellazione 3D sono distinte per caratteristiche e prestazioni e la scelta dipende dalle finalità del modello digitale finale, dalle caratteristiche geometriche e materiche del manufatto, dalle condizioni ambientali in cui deve avvenire il rilievo, dal budget a disposizione e soprattutto dall'esperienza. Le caratteristiche intrinseche dei singoli strumenti di rilievo sono connotate da un livello di complementarietà tale da rendere l'integrazione delle stesse più performante e flessibile, in grado di restituire un risultato decisamente migliore in termini assoluti e capace di adattarsi alle singole esigenze morfologiche dei diversi oggetti contenuti nella scena rilevata. L'integrazione delle tecniche, infine, permette di ottimizzare il processo di acquisizione e modellazione utilizzando ogni singolo strumento al meglio delle sue caratteristiche e prestazioni (fig. 7). Ma a prescindere da quale tecnica di rilievo ed elaborazione si decida di impiegare per il rilievo geometrico, il risultato che si ottiene è un

“modello digitale informativo”, ovvero un contenitore di informazioni legate al manufatto analizzato (rilievi geometrici 2D e 3D, geo-referenziazione, planimetrie CAD, immagini attuali e storiche, fonti bibliografiche ed iconografiche del reperto, dati di restauro, ecc.) e legate ad esso secondo diversi livelli di interattività (De Luca et al., 2011).

Se da un lato è evidente che non sia richiesta una conoscenza approfondita di aspetti sensoristici e di rilievo 3D da parte di architetti e archeologi (normalmente appannaggio di esperti nel settore del 3D modeling), dall'altro è richiesta una conoscenza dell'esistenza di queste tecnologie, delle dinamiche di funzionamento e delle loro potenzialità. Tale consapevolezza permette al personale non esperto di decidere innanzitutto quando è necessario ricorrere a tali tecniche di rilievo e documentazione, cosa è possibile derivare e quando invece è sufficiente utilizzare strumenti di studio tradizionali. Inoltre, vista la sempre maggiore necessità di integrare figure professionali differenti e competenze eterogenee all'interno di un progetto, la conoscenza di queste tematiche:

(i) permette di comunicare in maniera più chiara le finalità della ricerca a chi dovrà fare il rilievo, condividendone gli obiettivi finali;

(ii) permette di valutare la qualità dei risultati ottenuti e discutere eventuali problematiche incontrate nel corso del processo;

(iii) consente di utilizzare il modello digitale che viene generato al termine del processo di modellazione 3D per interrogarlo ed estrarne informazioni utili per l'analisi in corso;

(iiii) non implica né che la figura dell'architetto o dell'archeologo venga snaturata dal punto di vista professionale né la obbliga ad orientarsi verso una specializzazione estremamente verticale.

Oggigiorno è quindi sempre più importante essere consapevoli dell'importanza che stanno assumendo le tecniche di rilievo e documentazione 3D digitale e l'impatto che hanno nel processo di analisi, interpretazione e rappresentazione di una scena. È sempre più auspicabile una maggiore collaborazione con gli esperti del rilievo 3D al fine di ottenere migliori analisi e studi e non pretendere di voler fare tutto in casa.

Gli sviluppi futuri nel settore del rilievo e della mo-

7. Tabella delle principali caratteristiche relative alla tecnica fotogrammetrica e al laser scanner 3D (Russo & Remondino, 2011).

	Fotogrammetria Image-Based Modeling	Laser scanner 3D Range-Based Modeling
Caratteristiche		
Costo strumentazione (HW e SW)	Contenuto	Elevato
Maneggevolezza	Ottima	Sufficiente
Tempi per l'acquisizione dei dati	Minori	Maggiori
Tempi per la modellazione	Lunghi	A volte molto lunghi
Informazioni 3D	Da derivare	Dirette
Dipendenza dalla distanza	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalle dimensioni	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dal materiale	Indipendente	Dipendente
Dipendenza dalla luce ambientale	Dipendente	Indipendente solo per sistemi TOF
Dipendenza dalla geometria	Abbastanza dipendente	Indipendente
Dipendenza dalla texture	Dipendente	Indipendente
Scala / metricità	Assente / da fornire	Implicita (1:1 con dato reale)
Volume dei dati generati	Dipende dalla risoluzione delle immagini e dal tipo di misure	Nuvola di punti densa
Modellazione dei dettagli fini	Buona / ottima	Ottima
Texture	Inclusa	Assente / bassa risoluzione
Rilievo di spigoli	Ottimo	Abbastanza problematico
Analisi quantitative / statistiche	Per ogni punto calcolato	Globale
Software open-source	Pochi	Molto pochi

dellazione 3D sono molto promettenti. Nel settore dell'*imaging*, nuovi algoritmi faranno crescere il livello di automazione della procedura fotogrammetrica, tenendo sempre come obiettivo primario la creazione di un modello accurato. Nel settore della scansione 3D è auspicabile in primo luogo una diminuzione dei prezzi della strumentazione, un maggiore trasportabilità e nuovi metodi automatici per il trattamento delle nuvole di punti acquisite.

Di sicuro la ricerca ha ancora tanto da scoprire nel settore del rilievo e modellazione 3D. La collaborazione delle diverse comunità coinvolte nel settore geomatico può solo dare tanti vantaggi e nuove idee di ricerca.

REFERENCES

De Luca, L., Bussayarat, C., Stefani, C., Veron, P., Florenzano, M., *A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage*, Computers & Graphics, 2011, 35(2), 227-241.

El-Hakim, S., Gonzo, L., Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F., Whiting, E., *Detailed 3D modeling of castles*, International Journal of Architectural Computing, 2007, Vol. 5(2), pp. 199-220.

Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A., Ercoli, S., *A Multi-Resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archaeological areas*, International Journal of Architectural Computing, 2009, Vol. 7(1), pp. 39-55.

Guidi, G., Russo, M., Beraldin, J.-A., *Acquisizione e modellazione poligonale*, ISBN 8838665311, McGraw-Hill Companies, 2010, 480 pp.

Gruen, A., Remondino, F., Zhang, L., *Photogrammetric reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan*, The Photogrammetric Record, 2004, Vol. 19(107), pp. 177-199.

Hartley, R.I. & Zisserman A., *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004, 672 pp.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I., *Close range photogrammetry: Principles, methods and applications*, Whittles Publishing, 2006, 528 pp.

Mikhail, E.M., Bethel, J.S., McGlone J.C., *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiles and Sons, Inc. 2001.

Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., Remondino, F., *Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation*, Proc. 23th Int. CIPA Symposium, 2011, Prague, Czech Republic.

Remondino F. & El-Hakim S., *Image-based 3D modelling: a review*, The Photogrammetric Record, 2006, Vol. 21(115), pp. 269-291.

Remondino, F., El-Hakim, S., Gruen, A., Zhang, L., *Development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects*, IEEE Signal Processing Magazine, 2008, Vol. 25(4), pp.55-65.

Remondino, F., *Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning*, Remote Sensing, 2011, 3(6), pp. 1104-1138

Russo, M. & Remondino, F., *Laser scanning e fotogrammetria: strumenti e metodi di rilievo tridimensionale per l'archeologia*, in "Teoria e metodi della ricerca sul paesaggio d'altura", Brogiolo, Angelucci, Colecchio, Remondino (Eds), 2011, ISBN 978-88-87115, in press.

Stamos, I., Liu, L., Chen, C., Wolberg, G., Yu, G., Zokai, S., *Integrating automated range registration with multiview geometry for the photorealistic modelling of large-scale scenes*, International Journal of Computer Vision, 2008, 78(2-3), pp. 237-260.

Vosselman, G. & Maas, H.-G., *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, Dunbeath, Caithness, Scotland, UK. 2010.

Vu., H. H., Keriven, R., Labatut, P., Pons, J.-P., *Towards high-resolution large-scale multi-view stereo*, Proc. IEEE Conf. CVPR'09, 2009, pp. 1430-1437.