

TECNICHE DI RILIEVO TRIDIMENSIONALE IN ARCHEOLOGIA

di Sara Gonizzi Barsanti

La generazione di modelli 3D di oggetti ha colpito il settore dei Beni Culturali grazie alla capacità di combinare le informazioni metriche di alta precisione con una descrizione qualitativa e fotografica dell'oggetto. In realtà, questo tipo di prodotto è un supporto fondamentale per la documentazione, lo studio e il restauro dei Beni Culturali, fino ad una produzione di repliche, con tecniche di prototipazione rapida. L'archeologia in particolare è ampiamente interessata ad utilizzare nuove ed emergenti tecniche digitali disponibili e le tecnologie offerte dalla Geomatica. Ciò implica la possibilità di ottenere nuovi prodotti non solo durante la fase di rilievo ma anche nella fase di rappresentazione e visualizzazione, con l'obiettivo di ottenere una descrizione rigorosa e digitale dell'oggetto, e uno strumento per fornire un'analisi accurata e l'esplorazione dei dati.

Durante la ricerca archeologica emerge spesso la necessità di registrare, rilevare e conservare siti ed oggetti di interesse culturale, essendo la documentazione pre-requisito indispensabile per l'analisi, lo studio e l'interpretazione dei manufatti e delle aree archeologiche. L'aspetto che sta acquistando sempre maggiore importanza è il rilievo, diretto e indiretto. Differenza principale tra le due tecniche è che le trilaterazioni del rilievo diretto operano su un piano orizzontale bidimensionale su cui vengono proiettati tutti i punti misurati, mentre nella tecnica indiretta si agisce in uno spazio tridimensionale; questo comporta che le distanze risultino inclinate, gli angoli siano letti rispetto sia a un asse orizzontale sia a un asse verticale e i punti del rilievo vengano quindi restituiti all'interno di un sistema di coordinate spaziali x, y, z (Bianchini, 2008).

Il rilievo longimetrico comporta operazioni di misurazione a diretto contatto con i manufatti da documentare: un rilievo di questo tipo implica un grande dispendio di tempo e sicuramente non è preciso. L'utilizzo della stazione totale, un teodolite elettronico che comprende all'interno della sua struttura un distanziometro, permette di leggere direttamente su un display sia la distanza che le misure angolari; questo sistema è più veloce e preciso del rilievo manuale, ma è comunque necessario impiegare tanto tempo per registrare tutti i punti quanto più si desidera realizzare un rilievo preciso.

Come grado più evoluto di rilievo archeologico si possono indicare le misurazioni ottiche in tre dimensioni: rappresentano uno strumento versatile oltre ad avere numerosi vantaggi rispetto alle due metodologie prima descritte. Innanzitutto il tempo impiegato per realizzare il rilievo è decisamente più breve e l'accuratezza è maggiore, possono essere applicate ad una vasta varietà di scale, non necessitando di misurazioni a contatto evitano possibili danni agli oggetti archeologici, e il lavoro sul campo non deve essere interrotto per lunghi periodi durante la fase di rilievo. Non ultimo è l'aspetto economico: recentemente un'ampia gamma di sensori, prodotti

e strumenti sono divenuti disponibili anche a basso costo (Remondino, 2011).

L'archeologia, ed i beni culturali in generale, trovano nelle nuove tecnologie e tecniche un utile alleato non solo nella fase di rilievo su campo, con la possibilità di disporre di vere e proprie rappresentazioni rigorose degli oggetti rilevati, ma anche nella fase successiva: i modelli rappresentano un potente strumento per lo studio e l'analisi che sono fondamentali per la conservazione e l'eventuale restauro di siti, edifici, strutture ed oggetti. L'utilizzo del 3D consente di aumentare il livello di conoscenza dell'oggetto indagato perché permette di visualizzare un maggior numero di informazioni rispetto ai modelli bidimensionali: in questo modo una maggior quantità di dati viene registrata e messa a disposizione per lo studio del manufatto indagato.

L'impiego sistematico e corretto dei modelli 3D è relativamente recente e non ancora sufficientemente diffuso a causa degli alti costi soprattutto dei metodi *range-based* (tecniche basate su sensori attivi) e della difficoltà nell'acquisire un modello 3D preciso e corretto. A pesare maggiormente, però, è la pregiudiziale considerazione che esso sia opzionale all'interno della documentazione archeologica, un elemento estetico più che uno strumento utile per lo studio e la ricerca, e la difficoltà di integrare il 3D alla restante documentazione prodotta in 2D. Nonostante tutte le possibili applicazioni e la pressione costante delle organizzazioni internazionali a tutela del patrimonio culturale, un uso sistematico e mirato di indagine e modellazione tridimensionale non è stato ancora adottato come un metodo predefinito, anche se, rispetto al passato, sono sempre più numerosi i progetti di ricerca che si basano sull'utilizzo delle nuove tecnologie.

Tre sono le categorie di acquisizione ottica 3D degli oggetti e delle strutture:

- tecniche basate su sensori passivi (metodi *image-based*), come per esempio la fotogrammetria (Remondino, El-Hakim, 2006),

- tecniche basate su sensori attivi (metodi *range-based*), come per esempio il *laser scanning* (Böhler et al., 2004)
- combinazione di entrambe le tecniche (Voltolini et al., 2007; Guidi et al., 2009a/b).

La scelta della tecnica migliore e più appropriata dipende dall'oggetto o dall'area indagata, dall'esperienza dell'utilizzatore, dal budget, dal tempo a disposizione e dagli obiettivi prefissati.

La fotogrammetria può essere definita come "la scienza che permette di ottenere una misura accurata delle caratteristiche geometriche di un oggetto, come dimensioni forma e posizione, attraverso l'impiego congiunto di fotografie che lo ritraggono da posizioni differenti." (Guidi et al., 2010 pp. 17/18). Adoperata esclusivamente o in combinazione con il laser scanner, permette di aggiungere ad un'accurata descrizione geometrica in tre dimensioni, la ricchezza fornita dal contenuto radiometrico. Uno dei grandi vantaggi di questa tecnica è costituito dall'elevata maneggevolezza e dalla notevole economicità dei sensori e degli strumenti impiegati come cellulari e fotocamere.

A differenza del laser scanner, i modelli prodotti tramite fotogrammetria non sono metrici e necessitano di un riferimento esterno nelle fotografie per scalare successivamente il modello. La tecnica fotogrammetrica è caratterizzata dall'acquisizione di molte immagini RGB, registrate dalla medesima camera collocata in differenti posizioni. Si basa, infatti, sulla corrispondenza di punti omologhi su immagini bidimensionali per ricostruire, attraverso un procedimento matematico, le informazioni tridimensionali dell'oggetto analizzato. Successivi passaggi del procedimento sono la calibrazione dei parametri interni della camera, l'orientamento esterno delle varie posizioni di ripresa, la ricostruzione della superficie dell'oggetto, l'integrazione di tutte le superfici per l'elaborazione del modello 3D complessivo. Il punto di partenza per costruire le relazioni fondamentali della fotogrammetria è costituito dalla proiezione prospettica: un punto A proiettato su un piano di proiezione crea una traccia A' e i due punti si dicono omologhi. Una volta conosciuta la posizione del punto A nello spazio è possibile calcolare la sua posizione su un piano di proiezione posto a una determinata distanza dal centro di prospettiva. Però, se da un punto noto è possibile calcolare una sola traccia sul piano immagine, non è invece possibile fare il contrario, cioè calcolare da una sola immagine le coordinate di un punto nello spazio. Per questo motivo la fotogrammetria prevede che siano utilizzate almeno due immagini di una stessa scena, riprese da due punti di vista differenti. Misurando quindi la posizione sull'immagine della proiezione A' ripresa da due punti di vista diversi è possibile, con l'utilizzo di alcune equazioni matematiche, calcolare la distanza dalla camera del punto A in tre dimensioni. Semplificando, grazie ad una coppia di misure in uno spazio 2D (le immagini) è possibile conoscere una misura nello spazio 3D. In pratica è lo stesso procedimento che avviene automaticamente nel cervello: gli occhi possono essere assimilati alle due camere con le due retine che svolgono il ruolo dell'area sensibile su cui sono focalizzate le due immagini. Il cervello elabora le informazioni e, dalle due immagini disassate prodotte dagli occhi, fornisce il senso di tridimensionalità e profondità della scena.

Per oggetti complessi si procede all'acquisizione di un numero di immagini necessarie per coprirne l'intera superficie, stando attenti ad avere una buona sovrapposizione tra le diverse immagini in modo da identificare un numero adeguato di punti omologhi (almeno cinque). Perché la modellazione possa avvenire, è indispensabile la conoscenza dell'esatta posizione relativa delle immagini rispetto all'og-

getto da rilevare (orientamento esterno), ottenuta attraverso un preciso modello matematico, e le informazioni riguardanti le caratteristiche costruttive interne della camera (orientamento interno). L'orientamento esterno è determinato da sei parametri che rivelano la posizione spaziale e l'orientamento del sistema di riferimento della camera rispetto al sistema di riferimento globale dell'oggetto. L'orientamento interno è definito invece dalla distanza focale della camera e dai parametri per modellare gli errori sistematici per esempio dovuti alle lenti (distorsione).

La tecnica fotogrammetrica può utilizzare differenti tipi di immagini, da quelle subacquee a quelle satellitari (Fig. 1).

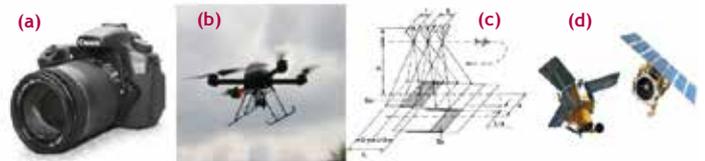


Fig. 1 - Diverse tipologie di fotogrammetria: (a) con l'utilizzo di una camera digitale per fotogrammetria terrestre; (b) da UAV; (c) da aeroplano; (d) da satellite.

I sensori attivi (*range-based*) come la scansione laser sono utilizzati per eseguire l'indagine di un oggetto o di un sito fornendo nuvole di punti 3D che possono essere unite fino ad ottenere l'esatta copia, metrica, dell'oggetto scansionato, direttamente in tre dimensioni. L'utilizzo dei laser scanner all'interno di un sito archeologico è però inusuale a causa degli alti costi della strumentazione (Bitelli et al., 2007), che tuttavia vanno fortunatamente diminuendo.

I sistemi attivi, soprattutto quelli basati su luce laser, operano indipendentemente dalla luce e dalla *texture* dell'oggetto da rilevare poiché ne modificano l'aspetto esteriore con luce opportunamente codificata, cioè "una luce caratterizzata da un contenuto informativo riconoscibile da un sensore elettronico, a differenza della luce ambiente diffusa, che non ha particolari elementi di riconoscibilità" (Guidi et al., 2010 p. 78). Nella scansione 3D interessa l'acquisizione in forma digitale dell'andamento nello spazio delle superfici di un oggetto: il sensore 3D suddivide la superficie proiettata sul sensore in elementi di immagine analoghi ai pixel di un'immagine digitale e valuta, per ognuno di questi, le corrispondenti coordinate spaziali.

Le tecniche a sensore attivo si suddividono in due grandi famiglie in base al tipo di metodo impiegato: a triangolazione e *time delay* (Fig. 2).

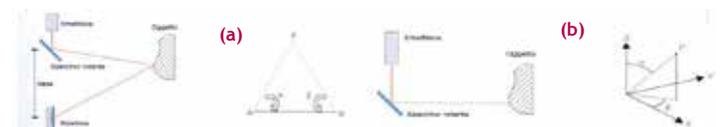


Fig. 2 - Differenza tra il principio a triangolazione (a) e quello a *time delay* (b) nei processi di modellazione *range-based*.

Il principio attraverso il quale vengono misurate le coordinate di un punto nei sistemi a triangolazione è analogo al metodo classico di triangolazione impiegato in topografia. Rispetto agli strumenti tipici del rilievo tradizionale, quelli a triangolazione operano su distanze minori, ma sono in grado di ottenere una maggior precisione (nell'ordine delle poche decine di micron) e tempi di scansione molto bassi (anche alcuni secondi per singola ripresa): per questi motivi gli strumenti che si basano sul principio della triangolazione

vengono spesso impiegati per la creazione di modelli digitali di statue e manufatti presenti soprattutto nei musei (Scopigno, 2006 p. 42; Guidi, 2010 pp. 78-95, 103-106). Gli strumenti *time delay*, a differenza di quelli a triangolazione, utilizzano soprattutto la procedura basata sulla misura del tempo di volo (TOF - *time of flight*) di un impulso laser, generato con una frequenza precedentemente imposta, di cui viene misurato il tempo trascorso tra la sua emissione e la ricezione riflessa dall'oggetto. La tecnica TOF si basa su una proprietà fondamentale delle onde luminose, ovvero la loro costante velocità di propagazione in un ambiente determinato: la misura del tempo di volo (l'intervallo di tempo tra l'impulso trasmesso e quello ricevuto) fornisce una valida stima della distanza. Dato che il mezzo in cui si propagano le onde non è il vuoto, si deve necessariamente applicare un fattore correttivo, chiamato indice di rifrazione, proporzionale alla densità del mezzo attraversato dalle onde. Il risultato viene inviato ad un microelaboratore interno che trasforma il dato ricevuto in una misura spaziale, precisa espressione della distanza tra il centro dello strumento ed ogni singolo punto rilevato (Fig. 3).

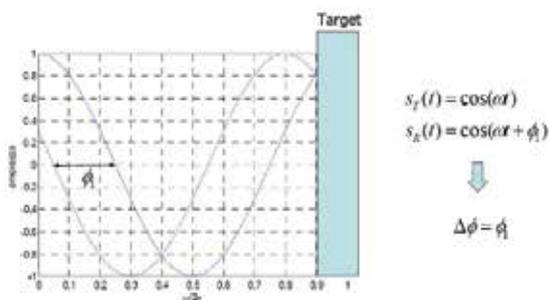


Fig. 3 - Differenza di fase.

Per ogni singolo punto sono rilevati la distanza tra il raggio di presa, l'angolo di inclinazione del raggio generato rispetto all'asse verticale dello strumento e l'angolo azimutale del raggio emesso rispetto ad un'asse orizzontale di riferimento. L'utilizzo di questa tecnica è indicata sia per superfici relativamente piccole, inferiori a 10 m, sia per quelle decisamente maggiori, fino a 1000 metri, mentre l'accuratezza nella determinazione delle coordinate varia da alcuni millimetri ad un paio di centimetri.

Le differenze tra i diversi metodi di rilievo applicabili all'archeologia e ai beni culturali in genere possono quindi essere così riassunte nella seguente tabella 1:

La modellazione 3D può essere estremamente rilevante nell'identificazione, il monitoraggio, la conservazione ed il restauro di siti, edifici ed oggetti. A una scala di paesaggio, la modellazione digitale 3D e la conseguente analisi dei dati permettono agli archeologi di integrare differenti elementi archeologici e contesti fisici e documentare l'area in un miglior modo che non semplicemente da cartografia 2D. A livello di sito archeologico o di monumento, il 3D permette di ottenere misure accurate e una documentazione oggettiva così come un nuovo punto di vista per l'analisi e dello stato di una struttura per la successiva diagnosi o restauro. La conoscenza di un sito è generalmente facilitata con l'esplorazione virtuale immersiva, usando tecniche di realtà virtuale basate su fotografie o strutture vettoriali e/o raster (Bitelli et al., 2007). A livello di artefatto, infine, la modellazione 3D permette di ottenere una replica fedele e accurata dell'oggetto, sia digitale che fisica grazie all'utilizzo delle stampanti 3D, in modo da poter studiare ogni artefatto, misurarlo, mostrarlo al pubblico, sia per applicarvi virtuali che per il restauro e la conservazione (Tab. 2).

I problemi e le maggiori sfide nel rilievo e nella modellazione 3D di siti di grandi dimensioni e di oggetti complessi si presentano in ogni fase del processo, dall'acquisizione dei dati alla visualizzazione dei risultati 3D ottenuti. La modellazione tridimensionale, come visto, va intesa come la generazione di dati 3D strutturati da dati rilevati non strutturati e consiste nella modellazione geometrica e della texture, per avere un modello accurato e foto realistico. La modellazione geometrica si occupa della registrazione e del processamento dei dati (*editing*, pulizia, *meshing*), mentre la modellazione della texture si occupa di fornire un risultato fotorealistico. L'intero processo di modellazione 3D è generalmente una catena di procedure molto lunghe e trasformazioni di dati effettuate per derivare nuovi prodotti (Remondino, 2011).

Nonostante il fatto che la documentazione 3D non sia ancora lo stato dell'arte nel settore dei Beni Culturali, risultano evidenti le enormi potenzialità delle moderne tecnologie di rilevamento digitale per documentare e preservare il paesaggio e il patrimonio, nonché nel condividere i dati e gestirli. La vera differenza, però, risiederà nei come tali tecnologie verranno utilizzate per arricchire ulteriormente la documentazione archeologica classica, grazie alla capacità di fornire non soltanto una ingente messe di dati puntuali, ma soprattutto nella possibilità di elaborarli e correlarli tra loro, al fine di generare nuovi dati la cui comprensione non sarebbe immediatamente intellegibile con le metodologie tradizionali.

	Rilievo diretto (longimetrico)	Rilievo indiretto strumentale	Rilievo fotogrammetrico e laser scanner
UTILIZZO	E' utilizzato solo in particolari circostanze e più che un metodo autonomo, deve essere considerato complementare a quello tridimensionale. Viene impiegato per produrre planimetrie e sospetti.	Viene impiegato nella maggior parte dei rilievi architettonici e archeologici, è particolarmente utile nel rilievo di piante e sezioni di edifici. Di solito è utilizzato insieme al rilievo diretto per la produzione di documentazione grafica archeologica (piante, prospetti, sezioni). Si rivela particolarmente utile nel rilievo urbano, mentre diviene indispensabile quando si vuole collegare l'opera da rilevare alla rete topografica nazionale. E' complementare al rilievo 3D.	Metodologia più accurata e precisa per la produzione di modelli tridimensionali da cui estrapolare informazioni 2D relative a piante, sezioni, prospetti. Il modello può essere inoltre per analisi statiche e delle lesioni degli edifici, per analizzare le fasi di vita di un edificio e per la produzione di ortofoto
VANTAGGI	Si misurano distanze, nessuna possibilità di acquisire e restituire modelli 3D.	Si misurano angoli e distanze. Lungo procedimento per acquisire e successivamente restituire modelli in 3 dimensioni.	Nessuna misura a contatto, nuvola di punti 3D che viene in seguito processata per la creazione di una superficie 3D accurata e precisa

Tab. 1 - Riassunto dei vantaggi e dell'utilizzo delle diverse tecniche di rilievo in archeologia.

Rilievo archeologico	Oggetti di interesse	Sensori e dati a disposizione
Scala Regionale	<ul style="list-style-type: none"> ■ Territorio ■ Topografia ■ Siti 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Immagini satellitari a media ed alta risoluzione ■ Immagini aeree a piccola scala ■ Radar e LIDAR ■ GNSS
Scala Locale	<ul style="list-style-type: none"> ■ Siti ■ Architetture ■ Scavi archeologici 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Immagini aeree a grande scala ■ Radar ■ ToF Laser Scanner ■ Immagini Terrestri ■ Stazione Totale ■ GNSS
Scala Oggetto	<ul style="list-style-type: none"> ■ Artefatti ■ Oggetti nei musei 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Immagini Terrestri ■ Laser Scanner a Triangolazione ■ GNSS

Tab. 2 - Differenti tipologie di rilievo archeologico e specifici sensori a disposizione.

ABSTRACT

The generation of 3D models of objects have affected the field of Cultural Heritage, thanks to the ability to combine highly accurate metrics information with a qualitative description and photographs of the object. In fact, this type of product is a fundamental support for the documentation, study and restoration of Cultural Heritage, up to a production of replicas with rapid prototyping techniques. Archeology in particular is widely interested in using new and emerging digital techniques available and technologies offered by Geomatics. This implies the possibility of obtaining new products not only during the phase of the survey but also in the phase of representation and visualization, with the objective to obtain a rigorous and digital description of the object, and an instrument to provide powerful analysis and exploration of data.

RIFERIMENTI

- Bianchini M. (2008) *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*, Roma: Aracne ed.
- Bitelli, G., Girelli, V., Remondino, F., Vittuari, L. (2007) *The potential of 3D techniques for Cultural Heritage object documentation*. Proceedings of Videometrics IX - SPIE-IS&T Electronic Imaging, vol. 6491.
- Böhler, W., Marbs, A. (2004) *3D scanning and photogrammetry for heritage recording: a comparison*. Proceedings of 12th Int. Conf. on Geoinformatics, 7-9 June 2004, Gävle, Sweden, pp. 291-298
- Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A., Ercoli, S. (2009) *Digitizing the Pompeii Forum*. 37th Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA 2009), 22-28 March 2009, Williamsburg, Virginia, USA
- Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A., Ercoli, S. (2009a) *A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archaeological areas*, International Journal of Architectural Computing, 7(1), pp. 40-55.
- G. Guidi, M. Russo, J.A. Beraldin (2010) *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, McGraw Hill
- Remondino, F. (2011) *3D recording for cultural heritage*. In "Remote Sensing for Archaeological Heritage Management", D.Cowley (ed.), EAC Symposium, 2011, pp. 107-116
- Remondino, F., El-Hakim, S. (2006) *Image-based 3D Modelling: a Review*. Photogrammetric Record, 21 (115), pp. 269-291.
- Scopigno, R. (2006) *Gestione efficiente di dati prodotti da scansione tridimensionale*, in S. Campana, R. Francovich (a cura di), pp. 41-68.
- Voltolini, F., El-Hakim, S., Remondino, F., Girardi, S., Rizzi, A., Pontin, M., Gonzo, L. (2007) *Digital Documentation of Complex Architectures by Integration of Multiple Techniques - The case Study of Valer Castle*. Videometrics IX (San Diego, USA, 29-30 gennaio 2007) Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging, Vol. 6491.

PAROLE CHIAVE

RILIEVO ARCHEOLOGICO; 3D; BENI CULTURALI; FOTOGRAMMETRIA; LASER SCANNER

AUTORE

SARA GONIZZI BARSANTI
sara.gonizzi@virtutum.eu
PRESIDENTE VIRTUTUM S.R.L.S..

Fu veramente un audace colui che per primo mangiò un'ostrica. Jonathan Swift

RIMANERE EPIGONI O INNOVARSI?

La nuvola è l'input
il modello informativo
il risultato



LIM[®] Lidar Information Model
PDM[®] Photo 3D Model

Pensati per
l'efficacia
l'efficienza
del progettare



LEI SI È INNOVATA... È SEMPLICE

RICERCA APPLICATA | SVILUPPO SOFTWARE | CORSI | TRAINING ON THE JOB
GEOMATICSCUBE.COM

GEOMATICA | COMUNICAZIONE | MULTIMEDIA
VIRTUALGEO.IT