

TECNICHE LASER SCANNER PER IL RILIEVO DEI BENI CULTURALI

1. INTRODUZIONE

Il patrimonio culturale per il suo valore storico ed estetico è un bene che rappresenta l'identità dell'uomo che con esso ha vissuto. La sua conservazione e valorizzazione necessitano di un'approfondita documentazione sia in termini più propriamente storico-artistici che per quanto concerne le caratteristiche fisiche di posizione, forma, colore e geometria.

Le discipline del rilevamento hanno affinato nel corso del tempo le tecniche di acquisizione dei dati al passo con lo sviluppo tecnologico; da semplici metodologie basate sul rilievo diretto a quelle derivate dalla geometria descrittiva. Le tecnologie introdotte recentemente permettono addirittura di rilevare e rappresentare con notevole accuratezza oggetti tridimensionali come sculture e reperti archeologici, nonché elementi di grandi dimensioni quali strutture architettoniche. L'unico metodo che, fino ad ora, soddisfaceva queste richieste era la fotogrammetria. Questo metodo, che in fase di ripresa è sicuramente veloce, obbliga però ad una lunga e delicata elaborazione in fase di restituzione.

Le maggiori attese nel settore dei Beni Culturali sono indirizzate alle tecniche laser a scansione tridimensionale; un sistema in grado di operare in modo sistematico nella velocità di acquisizione (si arriva a migliaia di punti al secondo) e nella possibilità di accedere direttamente ai dati in tempo reale (BARIBEAU *et al.* 1992).

Le applicazioni sono numerose: la documentazione e l'archiviazione dello stato di fatto di un monumento sono fondamentali in caso si verifichi la necessità di interventi di ricostruzione o conservativi. La possibilità di rilevare con notevole accuratezza geometrie molto complesse permette lo studio approfondito delle tecniche costruttive, consentendo la percezione e l'analisi di particolari geometrici difficilmente rilevabili con le tecniche tradizionali. Una rappresentazione tridimensionale, inoltre, porta ad una completa e più intuitiva percezione dello spazio, rendendo questo tipo di documentazione eccezionale anche nel campo della didattica (GODIN *et al.* 2000).

È importante ricordare che enti di ricerca e numerose società stanno da alcuni anni collaborando a progetti internazionali per la messa a punto di tecniche innovative di rappresentazione, adeguate alle principali problematiche sia relative alla conoscenza dello stato attuale che alle diverse fasi progettuali. Per riportare alcuni esempi, nel campo della modellazione di dati rilevati da scanner laser tridimensionale il Visual Computing Research Laboratory dell'Istituto di Scienza e Tecnologie per l'Informazione "Alessandro Faedo" (ISTI) del Consi-

glio Nazionale delle Ricerche ha collaborato sia al *Digital Michelangelo project*¹ (1999-2000), coordinato dal Prof. Marc Levoy della Stanford University, sia al *Minerva project*² (2000-2003) in collaborazione con il Restoration Laboratory della Tuscany Archaeological Authority, il National Institute of Applied Optics-Cultural Heritage Group (INOA) di Firenze (con il finanziamento del “Progetto Finalizzato Beni Culturali” del CNR ed il “RIS+” della Regione Toscana).

Il Centro D.I.A.P.R.E.M.³ (Centro Dipartimentale per lo Sviluppo di Procedure Automatiche Integrate per il Restauro di Monumenti) dell’Università degli Studi di Ferrara è volto alla costruzione di modelli digitali informatici avanzati per l’integrazione di metodologie sperimentali nel campo dell’acquisizione di dati dimensionali.

Tra le società interessate alle innovazioni tecnologiche ed attente al mondo della ricerca in Italia, si ricordano la SAT Survey S.r.l.⁴ di Venezia impegnata nell’ambito del rilievo 3D, della grafica e della diagnostica per l’architettura e la Topotek⁵ di Brescia quale Centro di Competenza nell’ambito delle tecniche del rilevamento e della geomatica attivato dal Consorzio Inn. Tec. in collaborazione col Dipartimento di Ingegneria Civile dell’Università degli Studi di Brescia come punto di incontro tra il mondo della ricerca e il tessuto industriale e produttivo, un osservatorio permanente multi-settoriale per problematiche tecnico-scientifiche.

Ritornando al caso delle applicazioni, la finalità di un modello digitale, che ricostruisca un oggetto reale, non è la sola rappresentazione atta a documentare il patrimonio artistico, ma può fornire una serie di dati sulla geometria dell’oggetto che possono essere estratti attraverso l’utilizzo di software dedicati.

Le fasi principali di un lavoro realizzabile con tecnologia laser sono:

- acquisizione;
- elaborazione;
- estrazione delle informazioni geometriche.

La prima fase deve prevedere sia l’acquisizione dei dati attraverso laser scanner, sia le riprese fotografiche. La fase di elaborazione, eseguita con i software dedicati alla gestione delle scansioni laser, porta ad ottenere i modelli finali, sia sotto forma di nuvola di punti che di mesh. Da questi modelli, utilizzando immagini fotografiche georeferenziate, è possibile ottenere il modello geometrico texturizzato. «An emerging quest is how to manage all the resul-

¹ Il progetto in dettaglio è consultabile nel sito <http://vcg.isti.cnr.it/projects/projects.htm>.

² Il progetto in dettaglio è consultabile nel sito <http://vcg.isti.cnr.it/projects/projects.htm>.

³ <http://www.diaprem.unife.it/>.

⁴ <http://www.satsurvey.com/>.

⁵ <http://www.topotek.it/>.

ting multimedia data (text/annotations, historical documents, 2D/3D images, vectorial reliefs, numeric data coming from the analysis, etc.) in an integrated framework, making all information accessible to the restoration staff (and, possibly, to experts and ordinary people as well)» (CALLIERI *et al.* 2004).

2. DESCRIZIONE DEL SISTEMA

La possibilità di acquisire informazioni sulla geometria di determinate regioni dello spazio o di uno specifico oggetto, in modo accurato, veloce e non invasivo, è ciò che caratterizza il rilevamento attraverso la tecnologia laser scanner 3D. Tale tecnica, nata inizialmente per scopi industriali, nell'ultimo decennio ha cominciato ad essere utilizzata nei campi più svariati come il monitoraggio ambientale, per rilevamenti topografici via aerea, come stazioni fisse per il controllo della qualità lungo le linee di produzione ed infine nell'ambito del rilevamento architettonico. Il grande vantaggio è costituito dalla possibilità di modellare oggetti con una densità di informazioni geometriche che non può essere raggiunta, in tempi ragionevoli, con nessun metodo di rilevamento di tipo tradizionale.

Il rilevamento attraverso una tecnica laser permette di ottenere una nuvola di punti ad altissima densità (in rapporto al modello di strumento utilizzato e alla distanza di acquisizione) per ognuno dei quali sono note le coordinate relative ad un sistema di riferimento intrinseco allo strumento, ed in alcuni casi, la riflettanza che è indicativa delle caratteristiche fisiche della superficie scandita. Le dimensioni degli oggetti rilevabili variano dai piccoli manufatti alle sculture fino ad edifici di grandi dimensioni, con alcuni limiti legati al campo visivo dello strumento dovuti in generale alla geometria delle superfici da rilevare.

Un elenco degli strumenti più diffusi (anche se non esaustivo di tutte le proposte in commercio) con indicazione della distanza massima di acquisizione, del sistema di ricezione del segnale ed il nome del software fornito, è riportato nella Tabella 1 dedotta dal sito <http://scanning.fh-mainz.de/> (consultazione febbraio 2005).

I lavori, che saranno presentati successivamente (§ 4), sono stati eseguiti con il sistema Callidus CP 3200 (distribuito da Trimble-Italia), costituito da un sistema di misurazione laser, un computer che memorizza i dati provenienti dallo strumento, una videocamera, un sistema di servo motori, un sistema di sensori angolari ed un sistema di livellamento automatico (Fig. 1).

Lo strumento acquisisce le informazioni geometriche e restituisce in tempo reale, sul monitor del computer in dotazione al sistema, una nuvola di punti che descrive la superficie rilevata.

L'unità laser presenta le seguenti caratteristiche:

- *range*, 80 metri con superfici naturali riflettenti;
- velocità di scansione 77scans/sec;

<i>Produttore</i>	<i>Scanner</i>	<i>Range (m)</i>	<i>Software</i>	<i>Sistemi ricezione</i>	<i>Sito Web</i>
Mensi	S10, S25	25	3Dipsos, RealWorks	measuring distance by triangulation	www.mensi.com
3rdTech	DeltaSphere	12	SceneVision-3D	TOF	www.3rdtech.com
CALLIDUS precision Systems	CP 3200	80	3D-Extractor	TOF	www.callidus.de
Leica Geosystems/ Cyra Technologies	HDS 4500 HDS 3000 HDS 2500	50	Cyclone 5.1, CloudWorx 3.0	TOF or phase difference	www.cyra.com
iQsun GmbH, iQvolution AG	iQsun	78	iQscene	TOF or phase difference	www.iqsun.com www.iqvolution.com
I-SiTE Pty Ltd	I-SiTE 4400	400	I-SiTE Studio	TOF or phase difference	www.isite3d.com
Mensi	GS 100, GS 200	100	3Dipsos, RealWorks	TOF or phase difference	www.mensi.com
MetricVision/Leica Geosystems	MV200 / LR200	60	software for dimensional analysis and surface rendering	TOF or phase difference	www.metricvision.com
Optech	ILRIS-3D	800	ILRIS-3D Parser	TOF or phase difference	www.optech.on.ca
Riegl Laser Measurement Systems	LMS-Zxxx series	1000	3D-RiSCAN	TOF or phase difference	www.riegl.com
Visi Image	3Dguru	36	3Dguru	TOF or phase difference	www.3d-gurus.com
Zoller+Froehlich GmbH	IMAGER 5003	55	Light Form Modeller	TOF or phase difference	www.zofre.de

Tab. 1 – Modelli scanner laser 3D in commercio.

range di scansione:

- orizzontale, piano-400gon;
- verticale, linea-166gon dalla verticale;

accuratezza:

- distanza Z, circa 5mm;
- lettura dell'angolo azimutale, piano-circa 17mgon;
- lettura dell'angolo zenitale, linea-circa 3mgon.

Durante il processo di misurazione, la testa dello strumento ruota, in modo automatico, di 360° sul piano orizzontale, compiendo piccole rotazioni che possono essere impostate tra 0,625°, 0,125°, 0,25°, 0,5° ed 1,0°. Ad ogni passo viene effettuata una scansione di ampiezza pari a 180° sul piano verticale, procedendo “a ventaglio” in senso orario.

Nel sistema è, inoltre, integrata una videocamera digitale, che permette anche di acquisire direttamente prese fotografiche dell'oggetto scandito.

2.1 Registrazione dei dati delle scansioni

Nella maggior parte dei casi, sia per un oggetto sia per un particolare architettonico, non è sufficiente una singola scansione per coprire per intero



Fig. 1 – Callidus 3200.

la regione o l'oggetto interessato, ma ne devono essere effettuate diverse e da vari punti di presa; infatti, il metodo di rilevamento attraverso laser scanner è limitato al campo visivo dello strumento, e per ottenere un modello completo di un oggetto dalla forma complessa sono spesso necessarie numerose scansioni da punti di presa differenti. Il numero delle scansioni dipende inoltre da numerosi fattori intrinseci al tipo di strumento utilizzato ed alla possibilità del suo posizionamento sul terreno (RAVELLI 2003).

I possibili ostacoli al campo visivo dello strumento sono costituiti sia dagli oggetti interposti tra questo e le superfici da rilevare, sia dalle discontinuità delle superfici stesse. Superfici adiacenti ma a differente quota generano, in corrispondenza ad esempio di uno spigolo, sulla superficie più lontana dallo scanner una zona d'ombra la cui ampiezza dipende dalla differenza di quota e dall'angolo di incidenza del raggio laser.

Le modalità di registrazione delle singole scansioni possono essere le seguenti:

- mediante l'utilizzo di bersagli o target;
- mediante il riconoscimento di caratteristiche geometriche;

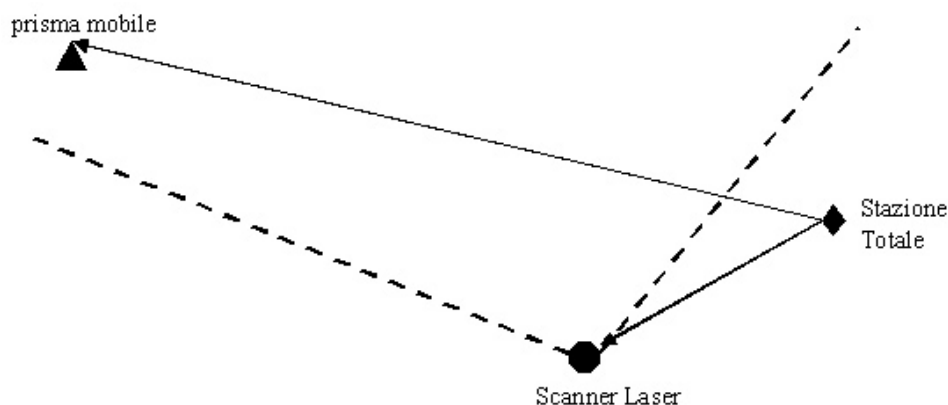


Fig. 2 – Schematizzazione del frame di rilevamento locale.

– mediante l’algoritmo ICP⁶. Tale metodo richiede che una stima delle posizioni relative tra due scansioni sia conosciuta *a priori*. Basandosi su questa stima, l’algoritmo cerca, per ogni punto di una scansione, il corrispondente più vicino nell’altra, ed utilizza la coppia di punti omologhi per calcolare la nuova posizione relativa tra le scansioni. Questo processo viene ripetuto iterativamente fino a quando la posizione relativa delle scansioni converge all’interno dell’intervallo definito dall’utente;

– mediante il riconoscimento di un prisma mobile (metodologia utilizzata dal laser Callidus). In questo caso particolare, la georeferenziazione delle informazioni ottenute e l’unione delle diverse scansioni avvengono attraverso due prismi, uno mobile che viene riconosciuto anche dallo scanner ed uno posizionato sulla testa dello strumento, da rilevare in modo da rispettare le normali condizioni geometriche spaziali e da consentire il collegamento tra i differenti modelli. Ogni singola posizione dei prismi viene rilevata da una strumentazione topografica tradizionale per generare un frame di rilevamento locale e per collegarli spazialmente, allo scopo di consentire un puntuale controllo metrico (Fig. 2).

2.2 Ricezione ed elaborazione del segnale

Esistono differenti metodi di lettura laser che si basano sull’incidenza di un raggio o di un fascio di luce sull’oggetto e sull’analisi del segnale di ritorno

⁶ Acronimo di *Iterative Closest Point*, è l’algoritmo che permette la registrazione di scansioni basandosi sul confronto delle posizioni relative di punti corrispondenti.

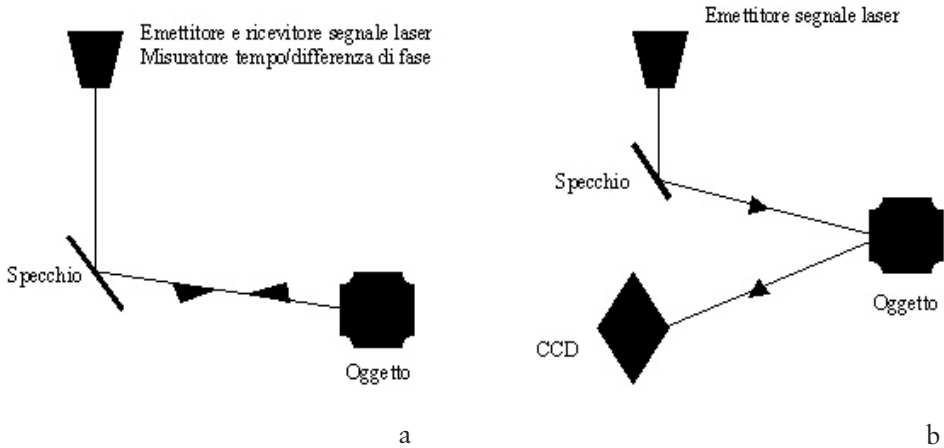


Fig. 3 – Laser a scansione: schemi di funzionamento.

(BITELLI 2002). In questa seconda fase si differenziano tre principi operativi dei differenti laser scanner attualmente in commercio: la misura del “tempo di volo” (TOF, *Time Of Flight*); il principio della triangolazione del segnale; il metodo di comparazione della fase.

I misuratori laser basati sul tempo di volo sono i più utilizzati per misurare medie e lunghe distanze. La distanza di misura può arrivare fino a 1500 metri, con precisione centimetrica, o fino a 500 metri, con precisione millimetrica. Il principio di funzionamento si basa sul tempo che impiega il segnale emesso a ritornare allo strumento; la distanza, insieme alla conoscenza dei due angoli di emissione del raggio, consente di determinare per coordinate polari la posizione del punto in questione (Fig. 3, a). Tali coordinate possono essere visualizzate in un sistema cartesiano (X, Y, Z) che ha origine nel centro dello strumento.

Altre tipologie di scanner invece si basano sul principio della triangolazione del segnale: la misura viene effettuata rilevando l’angolo con cui il ricevitore vede lo *spot laser*. I misuratori laser a triangolazione sono i più utilizzati per effettuare misure di precisione in campi da pochi millimetri fino a dieci metri. A seconda dell’applicazione si possono adottare strumenti che utilizzano un ricevitore di tipo PSD (*Position Sensor Detector*) oppure di tipo CCD (*Charge Coupled Device*). I sensori PSD consentono buone precisioni di misura con frequenze molto basse (da 10 a 100Hz), mentre i sensori CCD forniscono ottime precisioni con frequenza elevata (>1000Hz).

I misuratori equipaggiati con sensori PSD non sono quindi adatti ad applicazioni dinamiche, e cioè con supporti in movimento. In questo ultimo

caso, oltre alla risoluzione verticale (dz), occorre prestare attenzione alla risoluzione longitudinale (dx). In altre parole, è importante rendersi conto di quale sia la cadenza di misura nel senso di avanzamento del materiale.

La risoluzione longitudinale dx è regolata dalla seguente formula:

$$dx = v/f$$

dove:

dx = risoluzione longitudinale (mm)

v = velocità di avanzamento (mm/s)

f = frequenza (misure/s)

Deve essere inoltre valutata attentamente la superficie del materiale da misurare. Su superfici irregolari o semplicemente ondulate può essere necessario filtrare il segnale effettuando delle medie su un certo numero di misure.

Per misure su materiali in movimento o non stabili sono decisamente preferibili i misuratori equipaggiati con uno o due sensori CCD; un raggio luminoso viene proiettato su di un bersaglio e la sua immagine viene rilevata da un dispositivo ad immagine formante un determinato angolo con la sorgente (Fig. 3, b). Dall'acquisizione di numerosi profili paralleli, ottenuti facendo una scansione dell'oggetto, si ricava l'informazione necessaria per la realizzazione del modello tridimensionale. La posizione spaziale dei punti campionati nel profilo di luce è ottenuta per triangolazione dalla conoscenza dei parametri geometrici di misura (posizioni relative di laser, telecamera a CCD e punto oggetto). Questo tipo di sensore è infatti praticamente non condizionato dalle caratteristiche superficiali del materiale, permette una frequenza di lettura molto più alta e consente di eseguire agevolmente medie sulle misure acquisite.

Il metodo di comparazione della fase utilizzo in numerosi distanziometri elettronici opera grazie ad un raggio trasmesso che viene modulato da un'onda armonica. La distanza viene calcolata sulla differenza di fase tra l'onda trasmessa e quella ricevuta.

Questo sistema, applicando particolari algoritmi di elaborazione del segnale, permette di ottenere risultati di elevata accuratezza, a scapito però della velocità di scansione. È infatti necessario un segnale di ritorno ben definito. Questo tipo di scanner può operare solo a distanze ravvicinate.

Nei rilievi di oggetti o documenti di medie dimensioni, inoltre, sono sempre più impiegati misuratori basati sulla tecnica ottica della luce strutturata che sfrutta la proiezione di "codici" sulla superficie da misurare (Fig. 4). Il codice più semplice è costituito da un reticolo di linee parallele dalla cui analisi si risale alla mappa topografica digitale della superficie (BERTANI 1994).

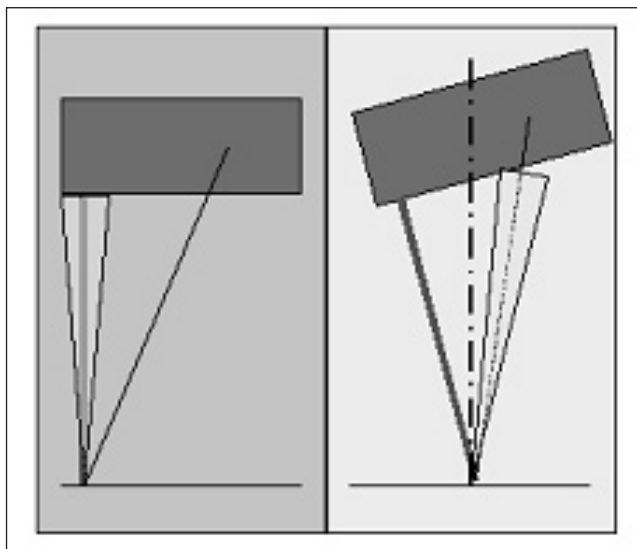


Fig. 4 – Posizionamento dello scanner rispetto ad una superficie riflettente.

3. METODOLOGIA DI LAVORO ED ELABORAZIONE DEI DATI

Il processo operativo, come accennato precedentemente, che conduce ad ottenere una rappresentazione tridimensionale di un determinato oggetto ha inizio con la pianificazione e l'esecuzione in campagna del rilevamento fino allo sviluppo di singole e specifiche procedure per l'elaborazione dei dati.

Lo schema mostrato nella Fig. 5 presenta il percorso che dovrebbe essere seguito per la realizzazione e l'integrazione dei rilevamenti tramite laser scanner. Il processo completo è stato separato in tre procedimenti paralleli: il primo riguarda le tecniche di acquisizione laser scanner, il secondo riguarda l'elaborazione dei dati ed il terzo il processo di acquisizione fotografica.

La fase riguardante l'elaborazione dei dati è a sua volta distinta nei due blocchi delle principali operazioni eseguite. Il primo sintetizza le operazioni preliminari di elaborazione dei dati; il secondo blocco interessa il processamento avanzato dei dati. In questa ultima fase lo schema presenta delle connessioni che legano il percorso laser scanner a quelli di texture mapping e fotogrammetrici, i quali hanno origine esattamente nel momento in cui la rappresentazione laser manifesta la necessità di essere completata (SGRENZAROLI, WOLFART 2002).

I processi fotogrammetrici conducono ad un modello che, una volta salvato in file di interscambio compatibili con altri software (tipo file in formato

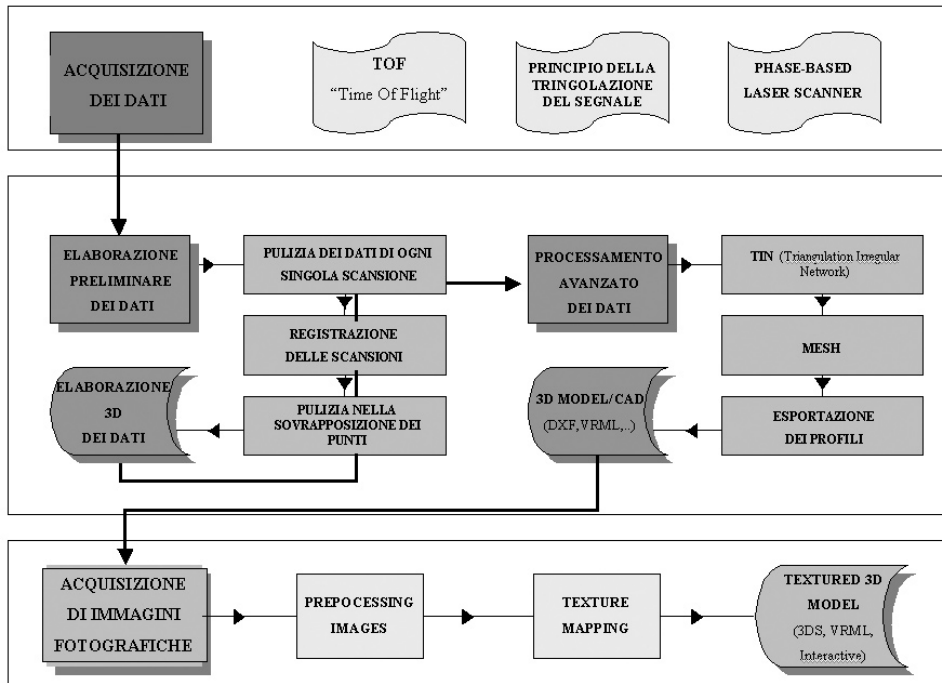


Fig. 5 – Schematizzazione delle principali procedure di acquisizione e trattamento dei dati laser.

VRML)⁷, può essere importato direttamente nel modello laser attraverso un software dedicato alla gestione dei dati laser scanner, per poi essere elaborato da quest’ultimo ed essere assemblato al modello triangolato. Dall’assemblaggio dei diversi modelli, infine, si ottiene la mesh completa.

L’acquisizione delle scansioni consiste in una serie di posizionamenti dello strumento nei punti predefiniti. Nel progettare la geometria ed il numero delle scansioni da eseguire, occorre cercare un punto di equilibrio tra due esigenze opposte. Da un lato si deve considerare che la mole di dati ottenuta con una campagna di scansioni raggiunge rapidamente dimensioni importanti, con conseguenti ricadute sulle capacità, o perlomeno, sui tempi di elaborazione; dall’altro che in base al processo di trattamento dei dati grezzi la loro precisione è influenzata anche dalla loro ridondanza. Risulta comunque necessario

⁷ Il *Virtual Reality Modeling Language* è un linguaggio sviluppato dal W3C con lo scopo di descrivere la geometria ed il comportamento di una “scena 3D” o “mondo virtuale”. I file sono in formato ASCII e possono essere visualizzati mediante un interprete o browser VRML. Le caratteristiche in dettaglio sono disponibili all’indirizzo http://www.web3d.org/fs_specifications.htm.

ottenere una buona sovrapposizione tra scansioni adiacenti per poterne eseguire l'integrazione ed avere una continuità nel modello.

La precisione di un rilevamento laser dipende dalle condizioni nelle quali sono state eseguite le scansioni: la limitazione maggiore è dovuta al fatto che il fascio laser non è una retta ideale, ma può essere assimilato, entro certi limiti, ad un cilindro. L'informazione sulla distanza dei punti deriva dall'integrazione di un intervallo di valori su di una superficie risultante dall'intersezione del cilindro laser con la superficie dell'oggetto: l'impronta laser. La dimensione dell'impronta laser, e di conseguenza l'accuratezza della misura, dipendono dall'angolo d'incidenza laser-superficie e dalla distanza (RAVELLI 2003).

Una volta ottenuta la nuvola di punti completa relativa all'oggetto di studio, è possibile procedere alla elaborazione dei dati ottenuti secondo schemi e procedure differenti in base al risultato finale che si vuole ottenere o agli obiettivi dello studio (SOUCY *et al.* 1996b). Si può così sintetizzare:

- creazione delle mesh;
- mappatura delle texture;
- integrazione dei modelli 3D laser e fotogrammetrico;
- estrazione di informazioni geometriche dal modello.

Fondamentale è la scelta di un software adeguato al modello di scanner in uso⁸, anche se purtroppo lo stato dell'arte presenta ancora delle lacune. Generalmente si tratta di programmi sviluppati per altri campi applicativi (settore industriale), con procedure che tendono a modellare su superfici regolari ed a riconoscere nell'oggetto solidi elementari (cilindri, parallelepipedi, ecc.) che difficilmente si possono trovare nell'ambito archeologico. Un elenco dei principali software in commercio è riportato nella Tabella 2.

Tali prodotti coprono una gamma di problematiche alcune delle quali possono appoggiarsi a pacchetti esterni, tipo CAD, mentre altre a software per la gestione di dati tridimensionali in forma di DTM. Complessa, invece, è la generazione di mesh per un oggetto a tutto tondo, come ad esempio una scultura; in questi casi il grigliato che si forma dai punti acquisiti con lo scanner laser non può essere gestito come una successione di coordinate puntuali (X, Y, Z) disposte in modo regolare in planimetria (come si fa per la modellazione del terreno), ma in modo tridimensionale, con la complessità che ciò comporta dal punto di vista computazionale (CIGNONI *et al.* 1998).

Inoltre, la sequenza di certe operazioni non è standard e si possono adottare differenti strategie in fasi diverse del medesimo processo di elaborazione, in rapporto alla complessità della superficie dell'oggetto.

⁸ I lavori di seguito esposti sono stati svolti mediante l'utilizzo del software *3D-Extractor*, prodotto da CALLIDUS Precision Systems GmbH. Il sito è consultabile all'indirizzo <http://www.callidus.de/>.

<i>Produttore</i>	<i>Tipo</i>	<i>Sito Web</i>
Inn.Tec s.r.l.	Reconstructor, Surveyor	www.topotek.it
InnovMetric Software	Polyworks Modeler	www.innovmetric.com
INUS Technology	RapidForm	www.rapidform.com
Istituto Universitario di Architettura di Venezia	OrthoLaser	www.iuav.it
kubit GmbH	PointCloud	www.kubit.de
metrologic group	Metrolog II	www.metrologic.fr
octocom AG	octoCAD	www.octocom.de
Paraform	Paraform	www.paraform.com
Raindrop Geomagic	Geomagic Studio	www.geomagic.com
SDRC	Imageware Surfacer	www.sdrc.com
Z+F UK Ltd.	Light Form Modeller	www.zf-uk.com

Tab. 2 – Principali software in commercio. Elenco dedotto dal sito <http://scanning.fh-mainz.de/> (consultazione febbraio 2005).

3.1 Valutazione dell'attendibilità dei dati ed integrazione

Nelle varie fasi del processo di elaborazione (ad esempio durante la registrazione e l'integrazione) è importante avere informazioni riguardo all'attendibilità della misura di ogni singolo punto (LINGUA, RINAUDO 2001). Il valore di attendibilità dipende da numerosi fattori:

- il tipo di scanner utilizzato per la scansione;
- l'angolo tra la superficie locale e la direzione della scansione;
- la distanza di scansione;
- l'intensità del segnale di ritorno.

In particolare nei rilievi architettonici è importante valutare anche l'informazione relativa ad elementi spigolari ed a strutture di forma cilindrica (come le colonne), poiché l'estrazione di sezioni e prospetti si basa sostanzialmente sulla loro definizione. Inoltre, si tratta di una informazione che può essere utilizzata nelle fasi successive dell'elaborazione per aumentare la risoluzione del modello triangolato.

L'integrazione delle scansioni, infine, permette di rimuovere la ridondanza di punti nella zona di reciproca sovrapposizione, in modo da ottenere un modello continuo privo di sovrapposizione tra le mesh.

Nella costruzione dei modelli alcune volte non è conveniente effettuare la fase di registrazione. Nelle zone di sovrapposizione, infatti, la ridondanza

dei punti può essere sfruttata per infittire la maglia triangolata ed aumentare la definizione del modello.

3.2 Creazione delle mesh

La creazione del modello triangolato, meglio conosciuto come mesh, consiste nella conversione della nuvola di punti in una superficie costituita da triangoli che produce una rappresentazione visivamente più intuitiva del modello, specialmente se mappata mediante l'utilizzo di immagini. Il processo di creazione della mesh avviene su due livelli: la triangolazione, che crea la mesh iniziale direttamente dai punti della scansione, e la semplificazione, che riduce la quantità di dati.

Esistono differenti approcci per triangolare i dati di scansione:

- 1) basandosi sulla griglia di dati 2D generata dallo scanner;
- 2) basandosi sulla nuvola di punti 3D.

La semplificazione della mesh è un procedimento necessario alla riduzione della quantità di dati (Fig. 6).

3.3 Mappatura della texture

L'obiettivo del processo di elaborazione delle immagini è di integrare i dati 3D di natura metrica, provenienti dallo scanner, con le informazioni 2D acquisite mediante una fotocamera interna od esterna allo strumento.

La mappatura della texture consiste nello stabilire una corrispondenza univoca tra i triangoli della mesh ed i punti dell'immagine fotografica, che verranno "spalmati" sul modello tridimensionale (cfr. *infra*). Ovviamente, per ottenere la copertura totale del modello triangolato è necessario acquisire diverse prese fotografiche da differenti punti di vista. Poiché le tonalità di colore delle immagini dello stesso soggetto, acquisite da punti di presa differenti, variano a causa della diversa illuminazione (problema che si presenta soprattutto per i rilievi in esterno), la proiezione delle prese fotografiche sul modello triangolato, senza un bilanciamento del colore e una sfumatura delle zone di transizione, creerebbe differenze radiometriche ed un effetto di discontinuità tra le scansioni.

È importante, quindi, sviluppare procedimenti di bilanciamento del colore e realizzare varie unioni delle prese fotografiche in modo da ottenere una immagine assemblata che copra completamente la superficie della scansione sulla quale verrà proiettata.

3.4 Integrazione dei modelli 3D laser e fotogrammetrico

Di fondamentale importanza è la possibilità di completare un modello ottenuto dalle misure con laser scanner mediante la modellazione fotogrammetrica. Questo procedimento permette di realizzare un modello tridimensionale integrato, dal quale possono essere estratte informazioni geometriche, ma anche



Fig. 6 – Esempio di ricostruzione di una tessitura su un manufatto.

informazioni estetiche molto dettagliate di alcuni elementi di particolare valore artistico. Le valutazioni sull'accuratezza e la risoluzione del modello geometrico della macchina da presa possono dare risultati paragonabili a quelli ottenuti dal modello proveniente dal rilievo laser (VELIOS, HARRISON 2002).

Questo tipo di applicazione può risultare molto produttiva nel caso in cui l'oggetto della ripresa non sia raggiungibile con il laser scanner per problemi di accessibilità (terreno sconnesso o posizioni troppo elevate) o per mancanza di spazio, fisicamente necessario al posizionamento della strumentazione. Il rilevamento fotografico deve essere, quindi, costituito da un sistema flessibile e facilmente trasportabile e da un protocollo di ripresa, in grado di fornire materiale per il trattamento al computer dei fotogrammi.

Il procedimento deve prevedere inizialmente un *bundle adjustment* per ottenere l'orientamento della macchina fotografica (ad esempio attraverso software commerciali); mentre per rappresentare la superficie specifica di un oggetto misurato si deve adottare un metodo di misurazione automatico o semi automatico. Tale metodo⁹ è fondato sull'idea di un processo guidato direttamente dalle conoscenze disponibili su una specifica classe di oggetti.

⁹ La metodologia nasce sul principio di funzionamento del software ARPENTEUR (Architectural Photogrammetry Network Tool for Education and Research) e del software ROMA, sviluppati dal Dott. Pierre Drap (UMR 694 MAP-CNRS, Scuola di Architettura di Marsiglia, Francia)

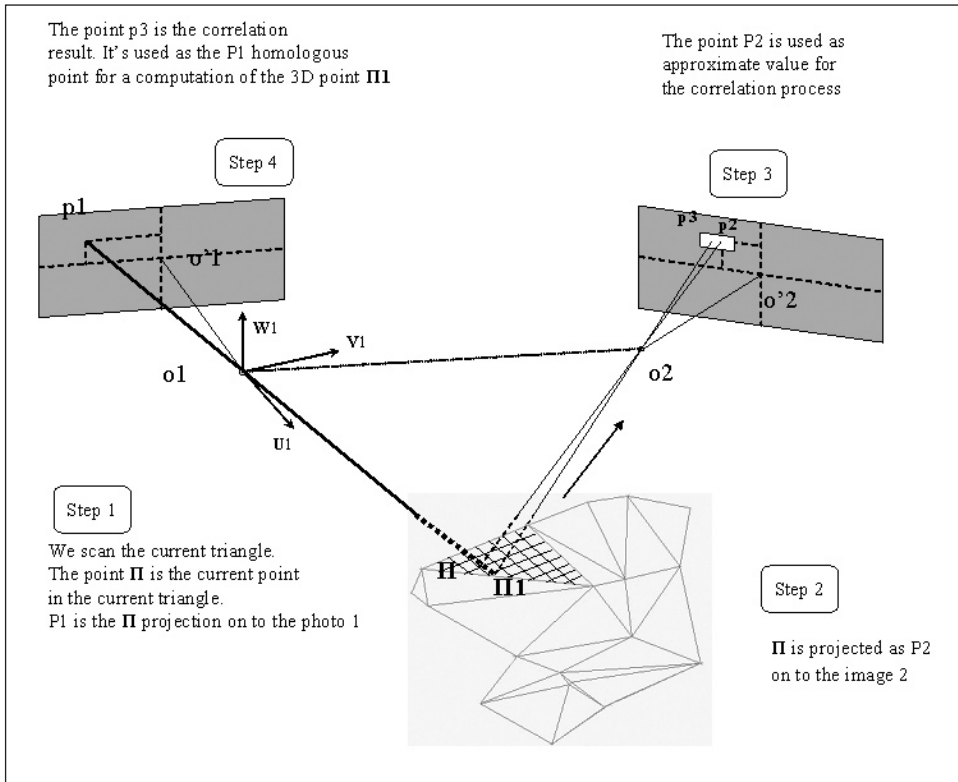


Fig. 7 – Schema tecnico della restituzione fotogrammetrica.

L'obiettivo è di creare un modello geometrico semplificato, cioè una maglia di superficie, e una serie di fotografie orientate per determinare i punti 3D visibili sulla fotografia ed inclusi nella maglia (DRAP *et al.* 2001).

La mesh viene misurata e calcolata da un insieme di punti 3-D visibile almeno su due immagini seguendo quattro fasi di lavoro, come illustrato in Fig. 7:

- esplorazione di ogni triangolo della maglia per ricavare il punto Π . Ogni punto Π è proiettato come $p1$ sulla prima immagine;
- il punto Π è proiettato come $p2$ sulla seconda immagine;
- il punto $p2$ è usato come una posizione approssimativa per iniziare il processo di correlazione con $p1$;
- il punto $p3$ è il risultato della correlazione. Tutti i punti omologhi a $P1$ sono stati utilizzati per calcolare il valore delle variabili x , y , z di $\Pi 11$.

Il vantaggio enorme dell'integrazione mediante una modellazione fotogrammetrica di questo tipo è costituito dall'economicità degli strumenti utilizzati: sono sufficienti un semplice apparecchio fotografico, preferibilmente digitale, ed un software di modellazione fotografica che permetta di effettuare l'assegnazione di coordinate esterne ai punti e supporti la codifica del modello in un formato numerico compatibile con i maggiori software di elaborazione in commercio (per es. VRML). Altro vantaggio notevole è la relativa esiguità del tempo necessario alla realizzazione del modello: l'acquisizione delle prese fotografiche è una operazione veloce, che può essere fatta in concomitanza al rilevamento laser, semplicemente valutando le nuvole di punti acquisite (la maggior parte degli scanner forniscono un software di acquisizione che visualizza in tempo reale la nuvola di punti) e localizzando le zone d'ombra.

3.5 Estrazione di informazioni geometriche dal modello finale

Il modello creato con il metodo laser scanner, e successivamente integrato mediante modellazione fotografica, è a tutti gli effetti un modello geometrico tridimensionale dal quale è possibile estrarre informazioni di tipo metrico. Questo è un aspetto fondamentale del rilevamento eseguito con tale metodologia; infatti, nello studio dell'architettura sia per finalità legate ad interventi di conservazione e di restauro, sia nel caso di un'analisi storica che richieda lo studio delle proporzioni geometriche degli elementi, risulta di estrema praticità la possibilità di ottenere queste informazioni direttamente dal computer. L'avere a disposizione un rilevamento caratterizzato da una conoscenza geometrica globale degli elementi sia strutturali che decorativi risulta di importanza notevole nel caso, non auspicabile, in cui il bene andasse perduto. Nel momento in cui si ha a disposizione il modello tridimensionale, l'estrazione delle informazioni geometriche viene effettuata attraverso l'utilizzo di applicazioni apposite con la possibilità di esportare il modello in formati standard (come il .dxf) per essere elaborato in CAD. Alcuni esempi di utilizzo di strumenti messi a disposizione dai software ed utili nell'ambito della conservazione dei beni culturali possono essere la misura di distanze, la misura di aree e volumi, la creazione di sezioni, l'estrazione automatica di spigoli e discontinuità e la creazione di viste ortografiche.

4. COSTRUZIONE DEL MODELLO GEOMETRICO DELLA COLONNA DEL TEMPIO DI HERA LACINIA

Viene qui presentato il percorso operativo che ha portato alla realizzazione del modello geometrico tridimensionale della colonna del Tempio di Hera Lacinia presso il sito archeologico di Capo Lacinio, oggi Capo Colonna (Crotone), partendo dai dati grezzi acquisiti con le operazioni di campagna.



Fig. 8 – Colonna del Tempio di Hera Lacinia, Capo Colonna (Crotone).

Il tempio, eretto quasi all'estrema punta del Capo, aveva un enorme basamento (stilobate) che lo innalzava al di sopra della roccia sottostante. La struttura architettonica, conforme al tipo greco detto periptero, era di ordine dorico con cella rettangolare allungata e doppio ordine di sei colonne sulla fronte. Tutto intorno l'area sacra era delimitata da un recinto sacro (peribolo), attorno al quale i Romani, più tardi, per desiderio di salvaguardare la struttura, aggiunsero un muro in *opus reticolatum*, i cui ruderi sono, anche oggi, ben visibili. All'interno del tempio si accedeva attraverso quattro gradini (GRECO 1982).

Dal santuario di Hera Lacinia proviene il cosiddetto tesoro di Hera, un vero e proprio patrimonio di capolavori, tra i quali il famoso diadema d'oro, la sirena, la sfinge alata, la gorgone, la barchetta nuragica e un'infinità di doni votivi che attestano quale celebrità il santuario godesse nel mondo antico. La tradizione, inoltre, racconta che nel suo interno si ergeva una colonna d'oro massiccio realizzata con doni votivi, della quale lo stesso Annibale avrebbe voluto appropriarsi se un sogno premonitore non lo avesse dissuaso dal farlo.

Del tempio classico rimane una colonna di ordine dorico, la penultima verso nord della fronte orientale, alta circa 8,30 metri (Fig. 8); il profilo del

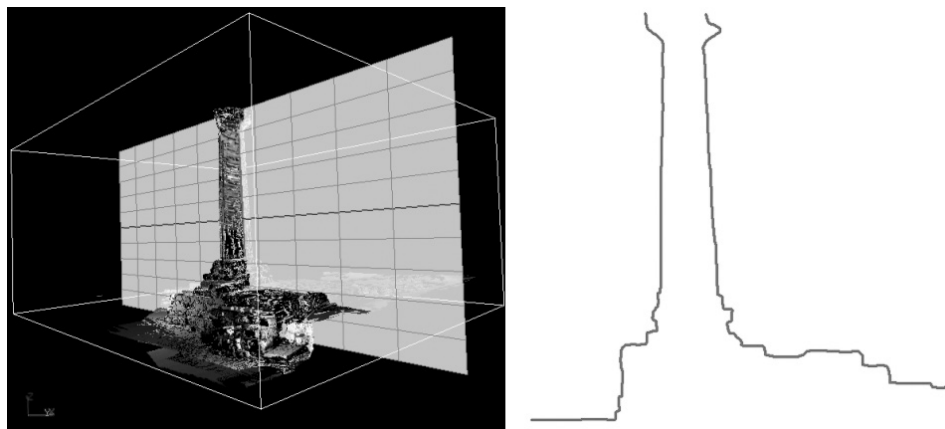


Fig. 9 – Sezione longitudinale della colonna del Tempio.

capitello è stato attribuito dal MERTENS (1996) al filone siceliota della prima metà del V sec. a.C. Anticamente il recinto del tempio si protraeva verso il mare per oltre mezzo miglio e i franamenti posteriori, nelle varie epoche e per i tanti movimenti sismici, ne hanno raccorciato la distanza dalla spiaggia, così che ruderi e colonna si trovano, oggi, quasi a ridosso del mare.

Lo scopo dell'intervento in questo caso era stabilire se le evidenti differenze tra la forma ideale dell'oggetto, ipotizzata sulle conoscenze di architettura antica, e la realtà del manufatto fossero state determinate da movimenti della struttura a causa dei cedimenti del terreno, a difetti costruttivi oppure ad una serie di accorgimenti costruttivi, concepiti durante l'ideazione del tempio. Quest'ultima ipotesi induceva a verificare la possibile esistenza delle cosiddette "correzioni ottiche", del tutto simili a quelle già studiate per il Partenone dalla fine del 1800.

L'obiettivo del lavoro era realizzare il rilievo della colonna del tempio attraverso una tecnica innovativa in grado, oltre che di mostrarne le dimensioni reali, di metterne in evidenza le deformazioni e la forma geometrica. Dopo un sopralluogo per determinare lo stato del manufatto e l'ambiente circostante, intorno al monumento sono state individuate 13 stazioni di ripresa poste ad una distanza compresa tra i 5 ed i 20 metri dalla colonna (Tav. XIV, a).

Nel caso di un simile soggetto particolarmente complesso, la pianificazione si rende sicuramente necessaria onde evitare di avere inutile ridondanza di dati, o peggio, mancanze nella copertura delle scansioni. Nel caso di geometrie semplici, e non troppo estese, la pianificazione può essere eseguita direttamente in campagna, negli istanti precedenti la fase di rilevamento vero e proprio (SOUCY *et al.* 1996a).

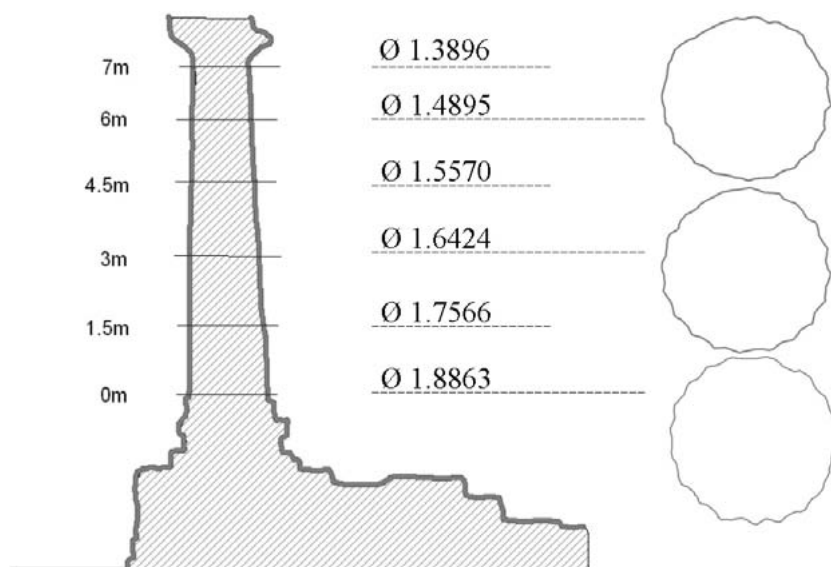


Fig. 10 – Estrapolazione delle sezioni della colonna del Tempio.

Sul modello geometrico della colonna del Tempio di Hera Lacinia è stata rilevata una sezione longitudinale della colonna del tempio; la ricostruzione della sezione è stata, poi, realizzata in modo puntuale e manuale con supporto CAD (Fig. 9).

Per la verifica delle proporzioni si è fatto riferimento alla dimensione del diametro della colonna a varie altezze (Fig. 10). Le misurazioni sono risultate di Ø 1.8863 all'imoscapo, di Ø 1.7566 a 1,5 metri, di Ø 1.6424 a 3 metri, di Ø 1.6424 a 4,5 metri, di Ø 1.4895 a 6 metri e di Ø 1.3896 a 7 metri; in questo modo si è dimostrato un assottigliamento della colonna verso il capitello.

La storia dell'architettura del mondo greco d'Occidente, infatti, insegna che per risolvere il noto conflitto d'angolo dell'ordine architettonico dorico di età classica era consuetudine contrarre gradualmente gli interassi delle colonne più vicine agli angoli. Inoltre veniva data alle colonne una leggera inclinazione verso l'interno del tempio per pareggiare le restanti piccole differenze e per formare, infine, il fregio, i triglifi e le metope con la massima regolarità (MERTENS 1996).

In particolare, dallo studio del rapporto del centro in cui sono stati iscritti i diametri della colonna all'imoscapo e all'altezza del capitello e dallo studio delle sezioni verticali è stato possibile osservare che l'asse della colonna è inclinato di un 1° verso est, in direzione del mare (Fig. 11). Queste analisi



Fig. 11 – Studio sullo stato di conservazione della colonna del Tempio.

hanno confermato i risultati delle indagini geofisiche realizzate sul basamento: entrambi i processi testimoniano lo stato di conservazione della colonna e la necessità di mirati interventi di restauro.

5. MODELLI GEOMETRICI NEI MUSEI: LA TOMBA DELLA PELLEGRINA (CHIUSI, SI)

Una volta che un oggetto viene registrato in tutti i suoi elementi ad alta risoluzione attraverso uno scanner laser tridimensionale, si possono utilizzare delle tecnologie “immersive” per studiare o promuovere un bene culturale attraverso una riproduzione virtuale a scopo di restauro, recupero, controllo delle deformazioni strutturali del bene architettonico e catalogazione. Infatti, in ogni modello 3D, le caratteristiche reali piccole e visibili solo a una distanza ravvicinata possono essere esaminate interattivamente, permettendo lo studio di dettagli interessanti come segni di strumenti di lavorazione o particolari di superfici. Inoltre, luoghi che devono essere chiusi al pubblico per ragioni di conservazione possono essere ancora studiati e visitati una volta che ne è stato creato un modello 3D.

Tali motivazioni hanno spinto alla realizzazione di un rilievo completo della monumentale Tomba della Pellegrina (Tav. XIV, b), una delle maggiori tombe di età ellenistica dell'intero territorio chiusino. La tomba, di complessa struttura, presenta un lungo *dromos* largo circa 1 metro, in forte pendenza con accesso ad est che si apre su quattro nicchiotti e due celle; sul fondo si apre la grande camera (m 5,25 × m 4,25 ca.) di forma rettangolare con due ampie cavità nella parte anteriore (BIANCHI BANDINELLI 1925).

Modellazioni tridimensionali di questo genere favoriscono la realizzazione di ambienti di realtà virtuale (VR), fondamentali per un nuovo tipo di comunicazione museale, che sta subendo profondi cambiamenti diventando multimediale e mediatizzata (LEVOY *et al.* 2000). Oltre a ciò, bisogna considerare che stanno emergendo i connotati di un nuovo tipo di utente museale: è un utente attivo, informato sulle potenzialità offerte dalla tecnologia o quanto meno pronto ad essere investito dal processo innovativo e formativo che un museo può produrre. È un utente attore che recita nel palcoscenico museale: con l'utilizzo di diversi media si può aumentare l'apprendimento di un particolare contenuto informativo non solo dal punto di vista quantitativo ma anche qualitativo, espandendo le potenzialità di acquisizione degli utenti.

Ma è anche possibile creare ambienti aperti tipici dei nuovi sistemi educativi attuali, in cui si fa fare esperienza al soggetto e gli si fa manipolare gli oggetti, ricreando situazioni specifiche dei comportamenti esplorativi del gioco attraverso due tipi di utilizzo: quello passivo, in cui l'utente esegue una navigazione, ad esempio all'interno della tomba secondo un percorso prestabilito e non modificabile; e quello attivo, in cui l'utente esplora l'ambiente muovendosi con discontinuità nello spazio 3D tramite appositi comandi. I risultati sono molto buoni pensando, ad esempio, ad un ambiente di realtà virtuale dove esistono molte possibilità di progettazione: nel caso di una tomba chiusa al grande pubblico o difficilmente accessibile per problemi di conservazione, le ricostruzioni realizzate divengono elemento ideale da collocare in museo per un turismo virtuale.

In poche parole l'interattività e la multimedialità moltiplicano non solo le occasioni di apprendere attivamente un contenuto informativo, ma permettono, attraverso la loro duttilità progettuale, di creare nel soggetto connessioni neurali che stratificano l'apprendimento, attraverso successivi rinforzi, appunto strumentali; questi ultimi favoriscono la ritenzione e l'assorbimento dei concetti principali, veicolati proprio da quella particolare organizzazione multimediale.

Un ulteriore campo applicativo di questo tipo di elaborazioni si rivolge alla fruibilità dei musei anche da parte di persone diversamente abili, per dare l'opportunità di far percepire l'arte a chi non vede, di far avvicinare a tanti capolavori dei nostri musei e del nostro territorio chi trova luoghi difficilmente accessibili, di comunicare l'emozione della bellezza a chi vede isolato nel silenzio. Infatti, nella corretta percezione, cognizione ed interpretazione delle immagini, si attuano sistemi di apprendimento strutturati e creativi che svolgono un ruolo importante nella formazione individuale e collettiva delle persone. Si consideri anche il grande pubblico dei "piccoli" per cui l'esperienza tattile risulta fondamentale, si tratti di giocattoli quanto di apprendimento.

La realizzazione del modello geometrico texturizzato di uno dei sarcofagi ritrovati all'interno della tomba, infine, è stato pensato per un altro tipo di applicazione molto interessante: il restauro "virtuale" di un manufatto (Tav. XV). Diversamente dal restauro tradizionale che viene eseguito su un oggetto oppure su di una struttura (procedimento di solito non reversibile), il restauro virtuale è applicato direttamente sulla copia numerica (ed è quindi reversibile). Per esempio, permette di interagire direttamente sui dati informativi, senza provvedere ad interventi spesso traumatici per l'originale; oppure in alcuni casi, elementi che sono stati aggiunti durante gli anni possono essere rimossi ed il modello 3D numerico può essere esaminato nel contesto storico corretto.

In questo modo si avranno insiemi di dati digitali che costituiranno il patrimonio del museo, attraverso l'organizzazione di enormi banche dati o archivi multimediali. Tali archivi, a differenza delle mostre, potranno essere strutturati come banche dati relazionali, esplorabili dall'utente attraverso workstation, con tutta una serie di informazioni relative alle opere esposte nel museo, come una specie di grande catalogo. Le informazioni saranno organizzate in forma ipertestuale e l'accesso alle informazioni (link) sarà di tipo iconico o di tipo testuale. Infatti molte delle opere esposte o quelle non accessibili saranno riprodotte, in base ai rilievi realizzati con laser scanner, nella loro forma geometrica: il visitatore potrà ingrandirle, vederle in altre dimensioni e sotto vari punti di vista.

6. CONCLUSIONI

L'utilizzo di laser scanner per il rilevamento dei beni culturali porta con sé alcune problematiche legate ai principi operativi sui quali si fonda il funzionamento dello strumento. Nei singoli paragrafi si è cercato di descrivere alcune di queste problematiche, sperimentando la costruzione di modelli geometrici, la loro integrazione ottenuta grazie alla possibilità di riferire le coordinate dei modelli ad un sistema di riferimento unico ed alla possibilità dei software impiegati di importare ed esportare i file in formati di interscambio tra loro compatibili.

Il risultato può essere un modello completo e di elevata risoluzione, ottenuto integrando il modello laser mediante un approccio operativo di semplice realizzazione e, cosa fondamentale, applicabile in modo generale anche per il completamento di elementi di complessa geometria.

Sempre mediante modellazione fotografica, poi, si è in grado di realizzare un modello dalla geometria pseudo-piana, caratterizzato da una texture ad elevata risoluzione. In questo modo alcuni particolari del modello 3D possono essere integrati, fornendo una rappresentazione molto dettagliata degli elementi architettonici più rilevanti, senza andare ad appesantire tutto il modello tridimensionale mappandolo completamente con immagini ad elevata risoluzione che lo renderebbero ingestibile dai computer attualmente in commercio.

Si è descritta la possibilità, inoltre, mediante software di elaborazione delle scansioni, di effettuare la mappatura di un modello geometrico, già precedentemente acquisito, con nuove prese fotografiche, generando di fatto un nuovo modello virtuale che permette il paragone tra situazioni temporalmente distanti dello stato di conservazione del bene architettonico. Riassumendo, si può affermare che i modelli geometrici realizzabili con laser scanner tridimensionale potrebbero avere diversi usi, tutti di grande utilità per una precisa documentazione del bene:

- un alto grado di realismo potrebbe essere di ausilio per ricostruire mediante le nuove tecniche il contesto in cui i manufatti sono stati scoperti o per ricreare il modo in cui sono stati usati;
- le sculture virtuali potrebbero essere apprezzate sullo schermo di un computer da ogni angolazione possibile, permettendo di ammirare i singoli particolari;
- la computer grafica potrebbe essere utilizzata per restaurare virtualmente le parti danneggiate di un manufatto;
- grazie all'animazione si potrebbero illustrare alcuni accorgimenti di prospettiva utilizzati dagli scultori nell'antichità;
- modelli computerizzati potrebbero essere usati per stabilire il tipo di illuminazione di pareti o sculture in maniera così precisa da attribuire i colori originali.
- un modello digitale potrebbe essere usato per realizzare accurati duplicati di una scultura ad ogni scala. In genere le copie di piccole dimensioni di sculture importanti non risultano accurate perché basate su un'interpretazione dell'artista contemporaneo. Accurate copie digitali potrebbero essere usate sia per la ricerca sia per intelligenti scopi commerciali, considerando il fatto che non sempre si possono effettuare calchi di oggetti particolarmente delicati, con la disinvoltura di un tempo.

DANIELA PELOSO

Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali
CNR – Roma

Ringraziamenti

Si ringrazia per la consulenza tecnica e la messa a disposizione delle strumentazioni topografiche la Sig.ra Italiano della Trimble Italia ed il Sig. Esposito della GeosystemGroup di Roma; per la fornitura della strumentazione laser scanner la società Te.Co-Terraing Consulting S.p.a. di Terni. Si ringrazia l'Università degli Studi del Molise nella persona del Prof. Mauriello, la Soprintendenza Archeologica per la Calabria nelle persone della Dott.ssa Lattanzi e del Dott. Spadea; la Soprintendenza ai Beni Archeologici di Roma nella persona dell'Arch. Filatici; l'Istituto Centrale per i Restauri di Roma nelle persone dell'Arch. Capponi, dell'Arch. Tedesco e della Dott.ssa Montedoro. Si ringrazia, inoltre, il Comune di Chiusi ed il Dott. Iozzo della Soprintendenza Archeologica della Toscana per la grande disponibilità e la fattiva collaborazione sempre dimostrate nei nostri confronti.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. 1985, *Archeologia e antiquaria a Chiusi nell'Ottocento*, Milano, Electa.
- BARCHESI C., CECCARELLI L. 2004, *Linguaggi descrittivi per la ricerca archeologica*, in P. MOSCATI (ed.), *New Frontiers of Archaeological Research. Languages, Communication, Information Technology*, «Archeologia e Calcolatori», 15, 95-113.
- BARIBEAU R., RIOUX M., GODIN G. 1992, *Recent advances in the use of a laser scanner in the examination of paintings*, in V. TODD et al. (eds.), *Proceedings of Restoration '92 Conference (Amsterdam 1992)*, London, United Kingdom Institute for Conservation, 69-73.
- BERALDIN J., RIOUX M., LIVINGSTONE F.R., KING L. 1993, *Development of a real time laser scanning system for object recognition, inspection, and robot control*, in *Proceedings SPIE, Telemanipulator Technology and Space Telerobotics*, Boston, 2057, 451-461.
- BERALDIN J.-A., BLAIS F., COURNOYER L., GODIN G., RIOUX M. 1998, *Unione di ambienti virtuali con il nostro mondo reale attraverso immagini 3D digitali ad alta risoluzione di oggetti e strutture*, Supplemento a «Paesaggio urbano», 4, 14-19.
- BERNARDINI F., RUSHMEIER H. 2002, *The 3D model acquisition pipeline*, «Computer Graphics Forum», 21.
- BERTANI D., CETICA M., MELOZZI M., PEZZATI L. 1994, *Topografia ottica ad alta risoluzione di superfici di dipinti*, in *Atti del 3° Convegno Nazionale "Strumentazione e metodi di misura elettroottici" (Pavia 1994)*, Pavia, 269-273.
- BIAGI MAINO D., BRUNI S., CIANCABILLA L., FERRIANI S., GANDOLFI G., MAINO G., VISPARELLI D. 1999, *Advances in digital image processing and archiving for works of art*, in L. BORDONI (ed.), *Proceedings of Workshop on Artificial Intelligence for the Cultural Heritage (Bologna 1999)*, Bologna, 109-119.
- BIANCHI BANDINELLI R. 1925, *Clusium*, «Monumenti Antichi dei Lincei», 30, 223-374.
- BITELLI G. 2002, *Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali*, in *Geomatica e l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale. Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA (Perugia 2002)*, Perugia, Maggioli, vol. 1, IX-XXIV.
- BITELLI G., CAPRA A., ZANUTTA A. 2002, *Digital photogrammetry and laser scanning in surveying the "Nymphaea" in Pompeii*, in W. BOEHLER (ed.), *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording (Corfù 2002)*, Thessaloniki, Publishing Ziti, 115-120.
- BOEHLER W., MARBS A. 2002, *3D scanning instruments*, in *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording (Corfù 2002)*, Thessaloniki, Publishing Ziti, 9-12.
- BORNAZ L., LINGUA A., RINAUDO F. 2002, *Il trattamento dei dati laser scanner nelle applicazioni terrestri*, in *Geomatica e l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale. Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA (Perugia 2002)*, Perugia, Maggioli, 483-498.
- Callidus Precision Systems GmbH: <http://www.callidus.de/>.
- CALLIERI M., CIGNONI P., GANOVELLI F. et al. 2004, *Visualization and 3D data processing in David's restoration*, in *IEEE Computer Graphics & Applications*, IEEE Comp. Soc., 24, 2, 16-21.
- CHANG S., ROTH G. 2003, *Free-form surface reconstruction from multiple images*, in *4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modelling*, Banff, Alberta, Canada, 163-170.
- CIGNONI P., MONTANI C., SCOPIGNO R. 1998, *A comparison of mesh simplification algorithms*, «Computer&Graphics», 22, 1, 37-54.
- COLOSI F., GABRIELLI R., MAURIELLO P., PELOSO D. 2003, *Cerveteri: topografia della Vigna Parrocchiale II. Metodologie integrate per lo studio di un'area archeologica*, «Archeologia e Calcolatori», 14, 177-197.

- CRIPPS P. 2004, *Moving into the third dimension: Three-dimensional data capture and manipulation*, «Archaeological Computing Newsletter», 61, 24-26.
- CURLESS B., LEVOY M. 1996, *A volumetric method for building complex models from range images*, in *Proceedings SIGGRAPH '96*, ACM SIGGRAPH, 303-312.
- DRAP P., GRUSSENMEYER B., GAILLARD G. 2001, *Simple photogrammetric methods with Arpenteur. 3-D plotting and orthoimage generation*, in *XVIII CIPA International Symposium (Potdam 2001)*, CIPA Heritage Documentation, 34, Part 5/c7, 47-54.
- DRAP P., GRUSSENMEYER B., CURTINOT P.Y., SEINTURIER J., GAILLARD G. 2004, *Presentation of the Web based Arpenteur tools: Towards a photogrammetry based heritage information system*, in *XXth ISPRS Congress (Istanbul 2004)*, Istanbul, IAPRS, 35, 123-128.
- GABRIELLI R., PELOSO D. 2004, *Tecniche laser scanner per il rilievo dei Beni Culturali*, «GEOmedia-Rivista italiana di Geomatica», 03, 28-32.
- GODIN G., COURNOYER L., DOMEY J., TAYLOR J. 2000, *Three-dimensional recording of objects and sites using laser range imaging*, «Quaderni del Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali della Scuola Normale Superiore di Pisa», 10, 139-150.
- GRECO E. 1981, *Magna Grecia*, Roma-Bari, Laterza, 104-110.
- GRECO E. 1992, *Archeologia della Magna Grecia*, Roma-Bari, Laterza, 46-47, 272.
- INOKUCHI S., SATO K., MATSUDA F. 1984, *Range-imaging system for 3D object recognition*, in *Proceedings of the 7th International Conference on Pattern Recognition (Montreal 1984)*, 806-808.
- LEVOY M., PULLI K., CURLESS B., RUSINKIEWICZ S. et.al. 2000, *The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues*, in *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (Ottawa 2000)*, New York, ACM Press, 131-144.
- LINGUA A., RINAUDO F. 2001, *Valutazione della qualità metrica dei dati acquisiti mediante laser scanner terrestre*, in *Atti della V Conferenza Nazionale ASITA (Rimini 2001)*, 2, 291-292.
- LOHR U. 1996, *Surveying single objects with a laser scanner*, «GIM-Geomatics Info Magazine», 10, 9, 6-7.
- MARTIN R. 1965, *Manuel d'architecture grecque*, I, *Materiaux et techniques*, Paris, 297-306.
- MERTENS D. 1996, *L'architettura del mondo greco in Occidente*, in G. PUGLIESE CARRATELLI (ed.), *I Greci in Occidente*, Catalogo della Mostra, Milano, 315-346.
- NG K.C., SEQUEIRA V., BUTTERFIELD S., HOGG D.C., GONÇALVES J.G.M. 1998, *An integrated multi-sensory system for photo-realistic 3D scene reconstruction*, in *Proceedings of the ISPRS (Int. Society for Photogrammetry and Remote Sensing), International Symposium on Real-Time Imaging and Dynamic Analysis (Hakodate 1998)*, 356-363.
- RAVELLI M. 2003, *Tecniche integrate laser scanner e fotogrammetriche per il rilevamento e la rappresentazione di architetture storiche*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Brescia, Facoltà di Ingegneria Corso di Laurea in Ingegneria Civile.
- RIOUX M., BERALDIN J.-A., BLAIS F., GODIN G., COURNOYER L. 1997, *High resolution digital 3-D imaging of large structures*, in *Three-Dimensional Image Capture. SPIE Proceedings (San Jose 1997)*, 3023, 109-118.
- ROCCHINI C., CIGNONI P., MONTANI C., SCOPIGNO R. 1999, *Multiple textures stitching and blending on 3D objects*, in G. WARD, D. LISCHINSKY (eds.), *10th Eurographic Workshop on Rendering (Granada 1999)*, Granada, 127-138.
- SGRENZAROLI M., WOLFART E. 2002, *Accurate texture-mapped 3D models for documentation survey and presentation representation purposes*, in *Proceeding of the CIPA WG 6 on Scanning of Cultural Heritage Recording (Corfu 2002)*, 148-155.
- SOUCY M., GODIN G., BARIBEAU R., BLAIS F., RIOUX M. 1996a, *Sensors and algorithms for the construction of digital 3-D colour models of real objects*, in *Proceedings of the IEEE ICIP (Lausanne 1996)*, 2, 409-412.
- SOUCY M., GODIN G., RIOUX M. 1996b, *A texture-mapping approach for the compression of colored 3D triangulations*, «The Visual Computer», 12, 503-514.

- VAN DEN HEUVEL F.A. 1998, *3D reconstruction from a single image using geometric constraints*, «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», 53, 6, 354-368.
- VELIOS A., HARRISON J.P. 2002, *Laser scanning and digital close range photogrammetry for capturing 3-D archaeological objects: A comparison of quality and practicality*, in G. BURENHULT (ed.), *Archaeological Informatics: Pushing the Envelope*, CAA 2001, BAR International Series 1016, Oxford, Archaeopress, 205-211.

ABSTRACT

Laser scanner technology permits a rapid elaboration of digital models of surfaces and complex geometries which would be impossible to survey with traditional topographic instruments. It therefore represents the proper technology for surveying archaeological sites and objects of Cultural Heritage.

In this paper the characteristics of different commercial instruments are described and their different resolutions in the acquisition of the coordinates and in measuring reflection. The presentation of some practical examples now gives us the opportunity to describe the operative process of 3D restitution from planning and performing the survey up to the development of specific procedures for the elaboration of data.