



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA

Dipartimento di Strutture

Antonio, Agostino Zappani

LE TECNICHE OTTICHE DI MISURA 3D NEL RILEVAMENTO ARCHITETTONICO

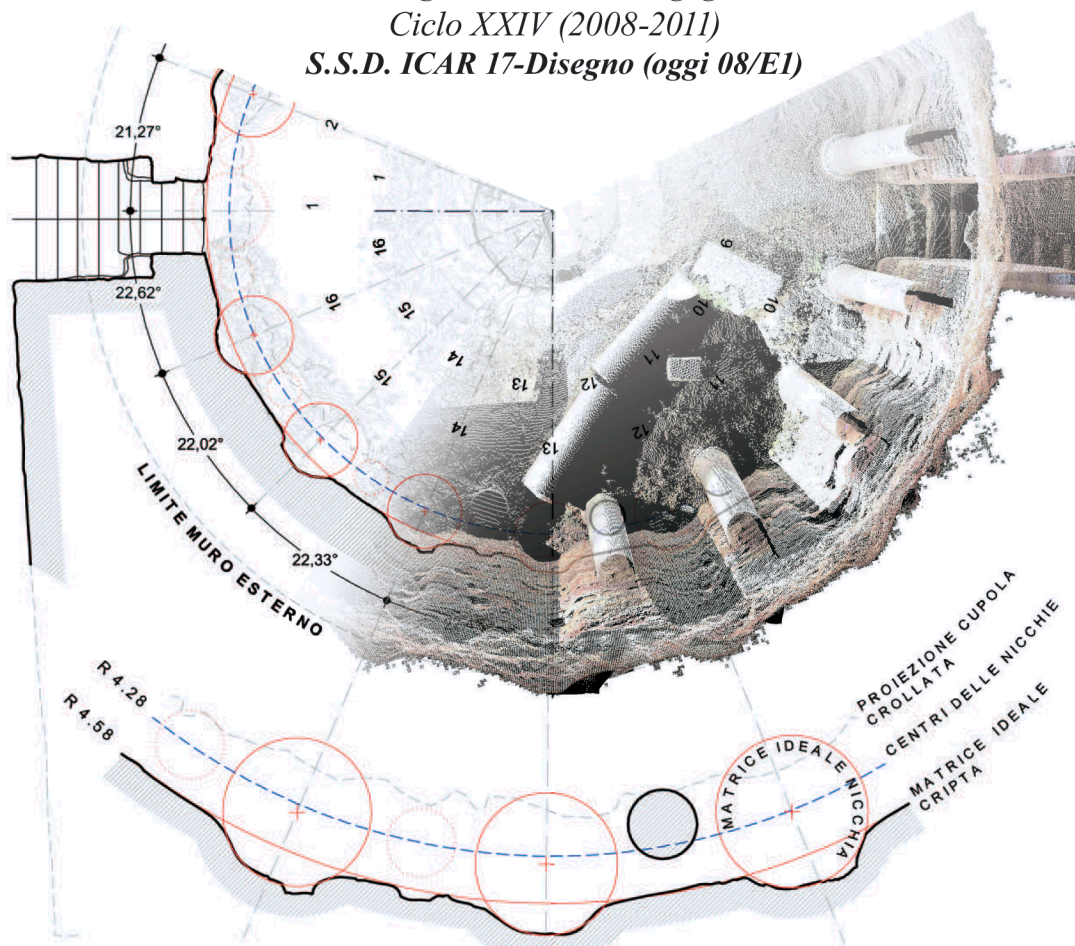
Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture

sezione: Metodiche dell'Architettura e della Costruzione

Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche

Ciclo XXIV (2008-2011)

S.S.D. ICAR 17-Disegno (oggi 08/E1)



Coordinatore: prof. Renato S. Olivito

Tutor: prof. Aldo De Sanctis

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA
Dipartimento di Strutture

Antonio, Agostino Zappani

**LE TECNICHE OTTICHE DI MISURA 3D NEL RILEVAMENTO
ARCHITETTONICO**

Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture
sezione: Metodiche dell'Architettura e della Costruzione

Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche

Ciclo XXIV (2008-2011)

S.S.D. ICAR 17-Disegno (oggi 08/E1)

Coordinatore: prof. Renato S. Olivito

Tutor: prof. Aldo De Sanctis

Ai miei genitori

<i>Premessa</i>	1
1 LE TECNICHE OTTICHE DI MISURA 3D	
1.1 Classificazione delle tecniche ottiche di misura 3D	3
1.2 Tecniche <i>range-based</i> per l'acquisizione metrica	8
Sistemi basati sul principio della triangolazione	8
Sistemi basati sulla stima del tempo di volo	14
1.3 Parametri di funzionamento del <i>laser scanner</i>	17
1.4 Artefatti della misura	25
1.5 Annotazioni sull' <i>iter</i> di costruzione del modello poligonale	31
1.6 Cenni sulla fotogrammetria digitale	41
2 LE APPLICAZIONI PER I BENI CULTURALI. RICOGNIZIONE, RIFLESSIONI E DEDUZIONI	
2.1 La ricognizione. Premesse metodologiche e struttura delle schede	47
2.2 Riflessioni e deduzioni. Attuali indirizzi e le linee di tendenza della ricerca	54
La griglia concettuale come strumento per l'analisi	54
Metodi, tecniche e procedure	56
La restituzione	67
3 IL MODELLO 3D E L'EVOLUZIONE DEI RAPPORTI COGNITIVI TRADIZIONALI	
3.1 Rilevamento tradizionale e nuvola di punti	79
3.2 La trasformazione del rapporto manufatto-rilevatore e il capovolgimento del processo di produzione dei disegni	85
3.3 Il manufatto simulato. Implicazioni, possibilità e potenzialità	93
3.4 Differenze e similitudini (apparenti) con il plastico tradizionale	98
3.5 Il modello 3D come sistema di dati integrati. Oltre la geometria e l'apparenza delle superfici	104
4 LE RESTITUZIONI AI TEMPI DELLE TECNICHE OTTICHE DI MISURA 3D	
4.1 La restituzione grafica come "contesto"	107
4.2 Caratteri delle restituzioni grafiche. Una raccolta di esempi	113
Considerazioni preliminari	113

Prodotti di immagine	117
I modelli 3D nella restituzione	128
4.3 Nuove opportunità grafiche per l'analisi: tre casi	136
La Tomba delle Anatre (Parco di Veio, Roma)	137
La Rotonda di Damos-el-Karita (Cartagine)	144
La chiesa di Santa Maria Assunta (Mesoraca, Crotone)	149
<i>Conclusioni</i>	155
SCHEDA	161
<i>Nota bibliografica</i>	231

Premessa

L'introduzione delle *tecniche ottiche di misura 3D* nell'ambito del rilevamento architettonico/urbano e, più in generale, in quello dei beni culturali, incide in maniera sostanziale sul modo tradizionale di "fare rilievo" modificando, sia il metodo e le procedure per l'acquisizione dei dati, che i rapporti dialettici tra il rilevatore, il manufatto e la sua rappresentazione. Il mezzo tecnico, se da un lato, incentiva nuovi scenari conoscitivi e stimola inedite opportunità per la documentazione, l'analisi, la fruizione e la restituzione del manufatto, dall'altro ne "condiziona" gli esiti, indirizzando il rilevatore verso situazioni grafico/analitiche e modalità d'indagine, per così dire, proprie della tecnica stessa.

Per valutare criticamente l'impatto di queste nuove tecniche sul rilevamento architettonico abbiamo condotto una ricognizione, ad ampio raggio, sulle esperienze di ricerca sviluppate, sia in campo nazionale che internazionale, al fine di conoscere lo "stato dell'arte" del settore (nella tesi proponiamo una classificazione estesa all'intero campo dei beni culturali – manufatti archeologici e architettonici, statue e dipinti – per ampliare e diversificare la nostra ricognizione, aggiungendo applicazioni che presentano elementi di significatività e originalità, trasferibili, anche all'ambito architettonico) e delineare un quadro conoscitivo, concettualmente fondato, sia sulle questioni di metodo e le attuali procedure operative, che sulle nuove opportunità di restituzione.

Le informazioni dedotte dalle esperienze selezionate, ri-organizzate all'interno di apposite schede e riepilogate in forma di sinossi (mediante griglie concettuali, diagrammi e tabelle), hanno favorito il confronto critico, consentendo di comparare, agevolmente, gli attuali indirizzi e le linee di tendenza della ricerca; hanno, altresì, permesso di "mettere ordine" e fare il punto delle esperienze, sintetizzandone ed evidenziandone i "concetti-chiave".

Parallelamente abbiamo classificato e analizzato le tecniche ottiche di misura 3D, studiandone vantaggi e limiti, principi di funzionamento e capacità

operative, ottimizzazione delle procedure e uso integrato di tecnologie differenti, con la convinzione che la conoscenza “*dell’universo dei mezzi*” e della “*razionalità che presiede al loro impiego*” sono premesse necessarie, non solo per guidarci nella scelta della tecnica più opportuna (per definire metodo e procedimenti adeguati allo scopo prefissato, per usare correttamente lo strumento, ...), ma anche per controllare gli inevitabili “condizionamenti” e la tendenza alla cosiddetta “autonomia” della tecnica, ossia la spinta a sollecitare e, quasi, ad “imporre” propri obiettivi di ricerca.

Il confronto tra il rilevamento tradizionale e quello caratterizzato dall’impiego di tecniche ottiche di misura 3D, identifica nella nuvola di punti, cioè nel modello numerico tridimensionale, un sistema strutturato di dati di diversa natura, in grado di concretizzare nuovi scenari operativi e conoscitivi: *documento digitale, archivio digitale, replica digitale, simulacro digitale* sono le diverse accezioni terminologiche con cui si definisce la nuvola di punti, per racchiudere in una locuzione le molteplici potenzialità e la carica rivoluzionaria di questo nuovo “soggetto”, che si interpone tra l’opera e la sua rappresentazione.

Il mezzo tecnico conforma, oggi come nel passato, tutto l’*iter* conoscitivo del rilevamento, compresa la fase di restituzione grafica dell’opera, anzi, esso stesso agisce attivamente nella formazione del pensiero, nel promuovere indagini e nel “suggerire” nuove opportunità per la documentazione, l’analisi, la visualizzazione interattiva, la simulazione virtuale, la comunicazione “dinamica”, la valorizzazione e così via. Per analizzare il ruolo della “tecnica” e le potenzialità analitico-figurative del modello, abbiamo realizzato un compendio di esiti figurativi, che esemplifica i modi correnti di indagare i significati di un’opera ed offre un elenco ragionato delle strategie di analisi grafica impiegate per favorire situazioni sia di interpretazione che di coscienza. Inoltre, in aderenza con gli obiettivi da cui ha preso le mosse il compendio citato, abbiamo selezionato tre casi studio e condotto direttamente una serie di sperimentazioni, per innescare un utile raffronto tra congetture “*fondate su indizi o apparenze probabili*”, speculazioni teoriche e strategia del comprendere attraverso il fare.

Parole chiave: rilevamento architettonico, tecniche ottiche di misura 3D, modello digitale tridimensionale, restituzione e analisi grafica.

CAPITOLO 1

LE TECNICHE OTTICHE DI MISURA 3D

1.1 *Classificazione delle tecniche ottiche di misura 3D*

I progressi della tecnica, sia in termini di sviluppo dei componenti *hardware*, della computer grafica e della *computer vision*, nonché dei *software* in grado di gestire ed elaborare, in maniera efficiente e con costi contenuti, le nuvole dense di punti, hanno permesso di estendere l'uso delle tecniche ottiche di misura 3D dal settore industriale a quelli dell'*industrial design*, dell'archeologia, dell'architettura, della paleontologia e così via.

Queste tecniche sfruttano la radiazione luminosa per acquisire i dati metrici delle superfici di un manufatto (o di un oggetto in genere), senza bisogno di alcun contatto fisico con il misurato, “valutando” la quota di energia elettromagnetica riflessa dalla superficie.

In relazione all'impiego o meno di particolari sorgenti di illuminazione, le tecniche ottiche di misura 3D possono essere suddivise in due gruppi: le *tecniche passive*, che utilizzano la luce ambientale della scena, qualunque sia la sorgente luminosa che la genera (luce naturale dell'irraggiamento solare, illuminazione artificiale, o mista naturale/artificiale) e le *tecniche attive*, in cui viene emessa e registrata una radiazione luminosa dalla struttura definita a priori e, quindi, nota al sensore che la riceve¹.

¹ In maniera equivalente e ponendo l'accento sul sensore, in letteratura sono comuni anche le locuzioni: *sensore 3D attivo* e *sensore 3D passivo*. Inoltre, preferiamo usare il termine *tecnica*,

Queste tecniche, oltre ad essere non distruttive, automatizzano il processo di acquisizione dei dati e permettono di registrare una quantità di informazioni con una velocità prima impensabile per altri dispositivi (ad esempio, i sistemi CMM²), contemporaneamente, consentono di ottenere misurazioni con un'elevata risoluzione geometrica, molto spesso non raggiungibile utilizzando altre forme di energia (ad esempio, gli ultrasuoni).

Ancora ricordiamo che l'automatizzazione del processo di acquisizione svincola questa fase dalle potenzialità percettive del rilevatore e la lega alle sole esigenze fisico-tecnologiche del sistema.

La classificazione delle *tecniche ottiche di misura 3D* senza contatto, che riportiamo in figura 1.1, riflette la divisione in *attive* e *passive* e le organizza in base al principio di funzionamento.

Nelle tecniche passive (dette anche *image-based modeling*, IBM), la luce ambientale, riflessa dagli oggetti, viene catturata e convogliata in un dispositivo ottico o optomeccanico, per estrarre informazioni di carattere geometrico e sull'apparenza delle superfici da immagini bidimensionali³.

La fotogrammetria digitale è un esempio di tecnica che utilizza le immagini fotografiche per descrivere la geometria e l'apparenza di un oggetto. Essa permette di definire le coordinate spaziali, la geometria e la *texture* della superficie, mediante l'uso di almeno due immagini fotografiche scattate da posizioni diverse. Le informazioni necessarie per acquisire i dati metrici

piuttosto che *metodo*, anche questo non infrequente in letteratura, poiché il suo spettro di significati racchiude, sia gli strumenti che il metodo e le procedure.

² Brevemente, il CMM (*Coordinate Measurement Machine*) è un dispositivo di misura che acquisisce le coordinate tridimensionali dei punti mediante il contatto fisico tra la punta sferica di metallo e la superficie dell'oggetto misurato. La possibilità di misurare le superfici, con un elevato grado di accuratezza, ne fa uno strumento molto usato nel campo dell'industria meccanica, ma che – al tempo stesso – presenta una serie di limiti:

- un volume di misura limitato alle dimensioni del braccio mobile;
- una bassa velocità di misura, dipendente dall'operatore, che sceglie quali punti campionare;
- misurazioni accurate, fino a raggiungere dislivelli di un micron, ma la dimensione della sfera (circa due millimetri) risulta un vincolo fisico insormontabile nel definire la risoluzione geometrica;
- la natura del materiale da misurare, nel caso di una superficie flessibile che si abbassa sotto la pressione imposta, rendendo impossibile la determinazione della geometria.

³ Può essere considerato un sensore passivo anche il teodolite, cioè un sofisticato meccanismo optomeccanico mediante il quale è possibile misurare le distanze in maniera indiretta, utilizzando le misure degli angoli azimutali e zenitali e collimando uno stesso bersaglio da almeno due differenti punti di vista.

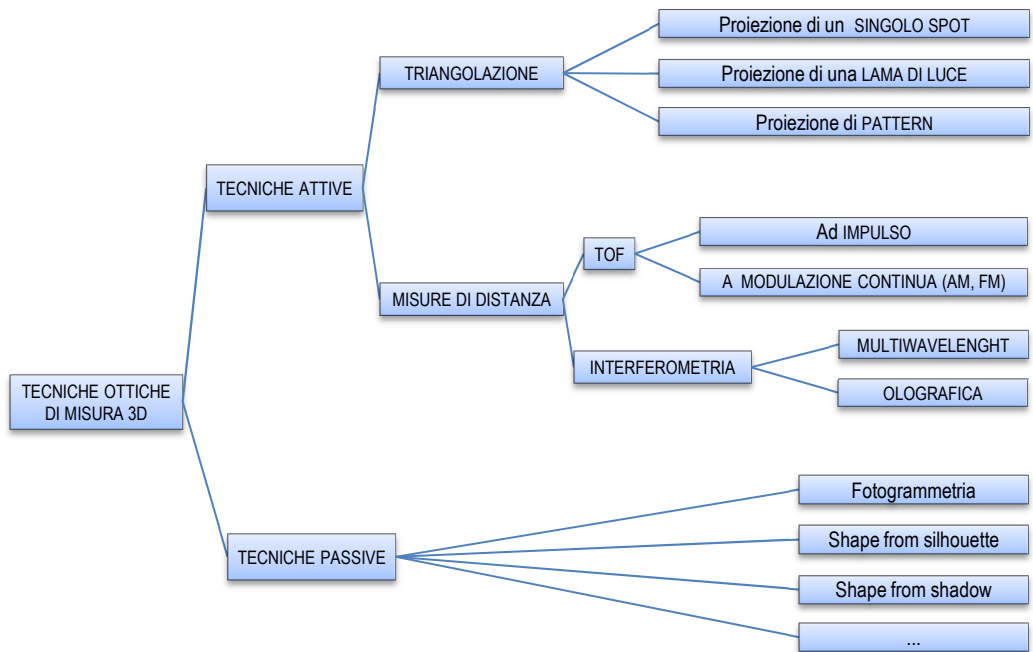


Fig. 1.1 – Classificazione delle tecniche ottiche di misura 3D.

tridimensionali, possono essere ottenute, sia manualmente che automaticamente, tramite i punti omologhi presenti nelle due fotografie.

Al secondo gruppo, cioè alle tecniche attive (altrimenti dette *range-based modeling*, RBM), appartengono tutti quei sistemi che utilizzano una luce opportunamente codificata⁴ per acquisire le coordinate spaziali di una superficie (e, se dotati di fotocamera, anche quelle colorimetriche). Uno strumento che utilizza una tecnica 3D attiva viene comunemente denominato *range camera* e, in particolare, per i sistemi che si basano sul *laser*⁵ si parla più propriamente di

⁴ La luce codificata è caratterizzata da un contenuto informativo conosciuto dal sensore, a differenza della luce ambientale diffusa, che non ha elementi di riconoscibilità.

⁵ Il *laser* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) è un dispositivo in grado di emettere un fascio estremamente collimato di luce coerente (radiazione direzionale caratterizzata da quanti di energia in fase fra loro), usualmente monocromatica (consistente di una singola lunghezza d'onda), con una luminosità superiore rispetto alle sorgenti luminose tradizionali (elevato numero di fotoni per unità di frequenza).

Altre due caratteristiche del raggio *laser* sono: la non uniforme distribuzione dell'intensità luminosa nella sezione trasversale del raggio e la divergenza, cioè l'ingrandimento della sezione man mano che aumenta la distanza dalla sorgente.

laser scanner 3D.

Le caratteristiche dell'oggetto da acquisire (dimensioni, articolazione volumetrica e spaziale, forme geometricamente complesse, peculiarità della superficie, ...), le contingenze del sito (accessibilità, ...) e dell'ambiente di lavoro (distanza di scansione, ...), insieme agli obiettivi del rilevamento, spingono a scegliere, di volta in volta, lo strumento più adatto, oppure a pianificare l'uso integrato di più dispositivi, con caratteristiche differenti.

Sulla base della classificazione proposta e volendo dare un primo riferimento a scopo puramente indicativo (cioè con un grado di semplificazione importante), possiamo dire che:

- i *sistemi a triangolazione* sono adatti all'acquisizione di limitati volumi di misura e, di conseguenza, sono usati per oggetti di piccola/media dimensione ed elevato dettaglio (statue, bassorilievi, capitelli, dipinti, ...). Questi sistemi danno luogo ad accuratezze elevate (fino a raggiungere le poche decine di micron) e campionamenti molto densi, mentre la loro velocità di scansione decresce al crescere della densità di campionamento;
- i *sistemi a tempo di volo o time of flight (TOF)* sono adatti per volumi maggiori (manufatti architettonici, siti archeologici, ...), presentano accuratezze dell'ordine di qualche millimetro e danno la possibilità di avere campionamenti abbastanza densi. Anche in questo caso, come già visto per i sistemi a triangolazione, la velocità di scansione è collegata alla densità di campionamento. In particolare, i *laser scanner TOF* a modulazione di fase sono caratterizzati da una velocità d'acquisizione ed un'accuratezza maggiore rispetto a quelli ad impulsi, mentre questi ultimi hanno un *range* d'acquisizione maggiore;
- i *sistemi basati sull'interferometria* sono usati per acquisire oggetti a piccola/piccolissima scala, raggiungendo accuratezze dell'ordine del micron, campionamenti estremamente densi e velocità di scansione dipendenti dal dispositivo meccanico adottato per traslare la testa di scansione sulla superficie. Oltretutto, sono sistemi che hanno necessità di operare a distanza ravvicinata dalla superficie ripresa (presentano una

La monocromaticità permette di avere delle ottiche che focalizzano il *laser* in maniera molto efficace (poiché progettate per una lunghezza d'onda specifica); mentre la coerenza consente di avere un'intensità luminosa elevata.

- profondità di campo variabile, da qualche millimetro a qualche decina di millimetri e una distanza di lavoro, lungo z , di qualche decina di millimetri);
- i *sistemi a silhouette* definiscono le superfici mediante una serie di viste fotografiche dell'oggetto, il quale viene fatto ruotare in modo controllato. Sono sistemi dai costi contenuti, adatti per scandire artefatti di piccole dimensioni con basse accuratèzze;
 - la *fotogrammetria digitale* ha un ampio spettro di applicazione, che si estende dalla fotogrammetria aerea per la realizzazione della cartografia, alla fotogrammetria dei vicini (*close range photogrammetry*), usata nel rilevamento architettonico e urbano, nelle misurazioni industriali e per acquisire oggetti anche di piccole dimensioni. Si tratta di una tecnica molto flessibile (adattabilità a differenti contesti e condizioni di rilevamento, portabilità, ...), che può essere utilizzata, sia per rilevamenti ad alta che a bassa risoluzione, ma comunque con costi contenuti rispetto ai sistemi a triangolazione e TOF.

Da questa, seppur sintetica, descrizione delle peculiarità dei sistemi di acquisizione, emergono due considerazioni:

- la prima sottolinea come un solo sistema non sia in grado di coprire tutte le necessità che si possono presentare in un rilevamento architettonico, poiché non riesce ad operare efficacemente con oggetti piccoli e ricchi di dettagli e con strutture a scala architettonica;
- la seconda ci ricorda che i sistemi a triangolazione, quelli a tempo di volo e la fotogrammetria *close range*, sono i più appropriati per l'acquisizione 3D di manufatti architettonici;

Di seguito, tratteremo le due tecniche attive di acquisizione 3D maggiormente utilizzate nell'ambito del rilevamento architettonico e urbano, cioè i *sistemi a triangolazione* e *a tempo di volo*; allo stesso tempo, accenneremo alla fotogrammetria *close range*, poiché gli sviluppi recenti la configurano come un'ulteriore tecnica in grado di integrare le tecniche attive e, al limite, anche di proporsi come valido sostituto, in determinate situazioni⁶.

⁶ Nel prosieguo del lavoro di tesi, con la dicitura tecniche attive (o *range-based*, o *range-based modeling*) indichiamo i sistemi a triangolazione e a tempo di volo, specificando, di volta in volta (e se reputato necessario), a quali dei due sistemi ci riferiamo; mentre, escludiamo i sistemi basati sull'interferometria che, per le loro peculiarità, non sono utilizzati nel campo architettonico. Inoltre, usiamo la dicitura tecniche passive (o *image-based*, o *image-based*

1.2 Tecniche range-based per l'acquisizione metrica

Sistemi basati sul principio della triangolazione

Gli strumenti basati sulla triangolazione sfruttano l'omonimo principio, la cui formulazione si deve al matematico fiammingo Gemma Frisius, che lo introdusse nel XVI secolo, come metodo per l'individuazione esatta delle località geografiche.

Il principio permette di risalire alle coordinate dei vertici di un triangolo, conoscendo la misura di uno dei lati (base della triangolazione), le coordinate di uno dei due vertici della base e l'azimut del lato uscente da esso.

Iniziamo questa panoramica dei sistemi basati sulla triangolazione riportando in figura 1.2 lo schema di una *range camera con proiezione di un singolo spot laser*⁷.

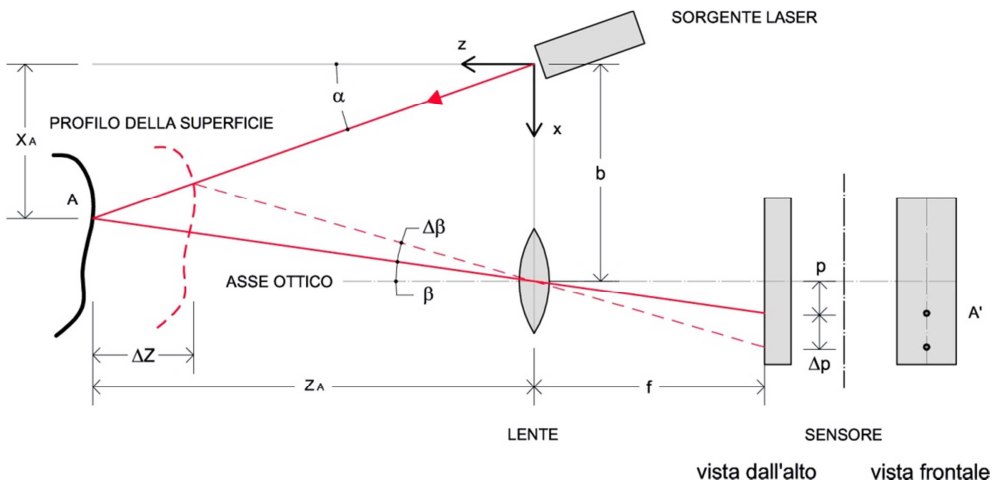


Fig. 1.2 – Schema di una range camera basata sul principio della triangolazione con proiezione di un singolo spot laser.

Nel caso in esame, la sorgente *laser* produce un fascio che, colpendo la

modeling), come sinonimo di fotogrammetria digitale e, in particolare, di fotogrammetria *close range*.

⁷ Uno dei primi articoli che descrive un sistema per l'acquisizione delle coordinate tridimensionali, basato sulla triangolazione con proiezione di un singolo *spot laser*, risale al 1968. (G. E. FORSEN, *Processing Visual Data with an Automaton Eye*, in *Pictorial Pattern Recognition*, Washington D. C., Thompson Book Co., 1968, pp.471-502)

superficie in un punto A , viene riflesso⁸ e catturato da un sensore d'immagine (CCD o CMOS)⁹. Il percorso del fascio materializza un ideale triangolo, in cui il punto luminoso generato dal raggio incidente sulla superficie, la sorgente del raggio *laser* e il centro ottico di proiezione sul sensore, ne formano i tre vertici. La distanza tra questi ultimi due è prefissata e viene denominata *baseline* (b)¹⁰.

L'immagine del punto luminoso viene focalizzata sul sensore, la cui distanza dal centro ottico di proiezione della lente è detta distanza focale o distanza principale (f). In tal modo, si ottiene una traccia A' sul piano del sensore che risulta disassata di una distanza p , rispetto alla proiezione dell'asse ottico.

Consideriamo un sistema di riferimento locale $\{x, y, z\}$, con l'origine nel punto d'uscita del raggio *laser*, l'asse x passante per il centro ottico di proiezione, l'asse z appartenente al piano contenente l'asse x e il punto d'incidenza del raggio sulla superficie, l'asse y orientato in modo da formare una terna destrorsa.

Le coordinate (x_A, z_A) dello *spot laser* incidente sulla superficie, calcolate mediante formule trigonometriche, valgono:

$$x_A = z_A \tan(\alpha) \quad (1.1)$$

$$z_A = \frac{b \cdot f}{p + f \tan(\alpha)} \quad (1.2)$$

Se il sistema è calibrato sono noti a priori, sia l'inclinazione α della sorgente luminosa (angolo di proiezione) che la *baseline*; inoltre, stimando la misura del disassamento p e nota la distanza focale f , si calcola l'angolo di ripresa β con la seguente formula:

⁸ Il segnale riflesso è influenzato da: distanza, condizioni atmosferiche, capacità riflettive della superficie (le superfici bianche hanno una riflettività più alta, al contrario di quelle scure; le superfici lucide sono difficili da acquisire, mentre quelle trasparenti non possono essere acquisite), luce ambientale, angolo di incidenza del raggio, lunghezza d'onda del laser, colore e scabrosità della superficie.

⁹ In questo caso, il sensore può essere monodimensionale.

¹⁰ In un sistema a triangolazione, il rapporto z/b influenza la precisione della misura. Solitamente si usa un valore variabile da 1 (buona precisione) fino ad un massimo di 4-5 (scarsa precisione). È comune il rapporto 2-3, cioè un valore intermedio di questo intervallo.

$$\tan(\beta) = \frac{p}{f} \quad (1.3)$$

La naturale estensione del sistema a singolo *spot laser* è rappresentata dalla *range camera a lama di luce laser*, cioè da un dispositivo che proietta una serie di *spot* allineati a formare un segmento luminoso, la cosiddetta *lama di luce* (Fig. 1.3).

Quest'ultima è generata da un fascio *laser*, che viene riflesso sulla superficie da uno specchio rotante o da una lente cilindrica, consentendo di acquisire l'intero profilo dell'oggetto.

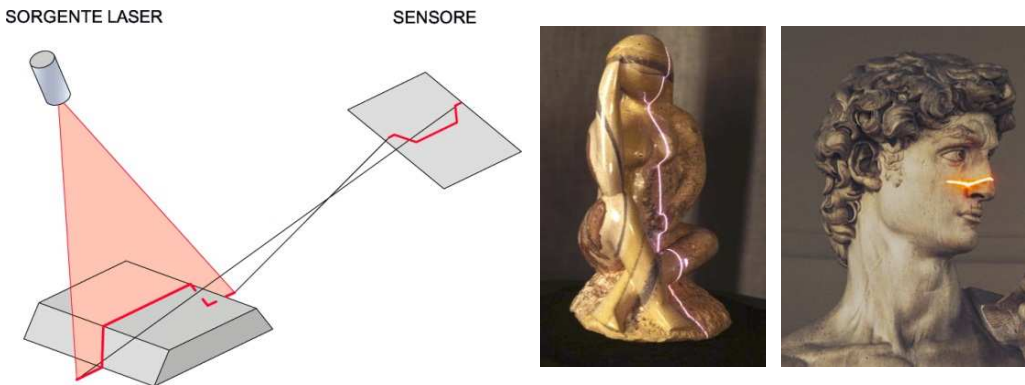


Fig. 1.3 – Schema di una *range camera a triangolazione basata su lama di luce*. Quest'ultima è generata da un fascio *laser*, che viene riflesso sulla superficie da uno specchio rotante o da una lente cilindrica, consentendo di acquisire l'intero profilo dell'oggetto (NRC Canada e *the Digital Michelangelo Project*).

In maniera del tutto analoga a quanto accade per i sistemi a singolo *spot*, stimati i valori del disassamento p lungo x e lungo y e nota la distanza focale f , si calcolano l'angolo orizzontale β e verticale γ con le seguenti formule:

$$\tan(\beta) = \frac{p_x}{f} \quad (1.4)$$

$$\tan(\gamma) = \frac{p_y}{f} \quad (1.5)$$

Le due coordinate (x_A, z_A) di un generico punto luminoso che forma il profilo, sono uguali a quelle presentate rispettivamente nelle formule (1.1) e (1.2), mentre la y_A vale:

$$y_A = z_A \tan(\gamma) \quad (1.6)$$

Il sistema a singolo *spot* acquisisce le coordinate (x, z) di un punto, perciò per determinare compiutamente la volumetria di un oggetto è necessario accoppiare alla testa dello *scanner* (l'insieme sorgente *laser*, ottiche e sensore), un dispositivo meccanico in grado di imprimere uno spostamento lungo gli assi x ed y . Il risultato è uno *scanner* 3D che raggiunge accuratissime, ma la presenza di movimenti meccanici di precisione ne fa lievitare i costi, rendendolo adatto per applicazioni di estrema accuratezza su aree limitate.

Il sistema a lama di luce *laser* acquisisce le coordinate (x, y, z) di una sequenza di punti disposti a formare un profilo; di conseguenza, per ottenere la volumetria di un oggetto si deve imprimere una traslazione o una rotazione alla testa di scansione. I movimenti, in questo caso si riducono ad uno, con un relativo abbassamento dei costi di realizzazione dello strumento.

Naturalmente i due sistemi illustrati rappresentano dei paradigmi iniziali per comprendere il principio di funzionamento degli *scanner* a triangolazione, ma in realtà, lo sviluppo attuale di questi sensori attivi ha raggiunto livelli elevati di sofisticazione, con l'utilizzo di metodi e criteri tecnicamente molto complessi.

Senza avere la pretesa di essere esaustivi, elenchiamo alcuni sistemi evoluti a triangolazione e ne riportiamo gli schemi in figura 1.4:

- *sistemi che utilizzano il principio di Scheimpflug*. Per aumentare la profondità di campo oltre il limite imposto dal diaframma della camera, si inclina il sensore rispetto alla lente in maniera che i piani del soggetto, del sensore CCD e della lente incidano in un'unica retta (retta di *Scheimpflug*). Inoltre la direzione del fascio *laser* deve essere tale da appartenere al piano focale (che nel nostro caso coincide con il piano del soggetto (Fig. 1.4a);
- *sistemi con doppia camera (dual view triangulation)*. La doppia camera consente di: raggiungere incertezze minori, mediante l'incremento "virtuale" della *baseline*; avere misure sovrabbondanti e, quindi, un'accuratezza migliore; eliminare l'interferenza della luce ambientale. Ne risulta un meccanismo complesso da costi elevati (Fig. 1.4b);
- *sistemi a singola camera con maschera a due aperture (Biris)*. Il fascio *laser* riflesso dall'oggetto misura una doppia immagine dello stesso punto, permettendo di avere gli stessi vantaggi del sistema *dual view* senza bisogno di un secondo sensore CCD. La dimensione limitata delle aperture della

maschera determina una “grande” profondità di campo (Fig. 1.4c);

- *sistemi sincronizzati e auto-sincronizzati*. La sincronizzazione riguarda la sorgente *laser* e il sensore CCD che acquisisce il fascio *laser*. I vantaggi di questo metodo consistono: nell’aumento della precisione lungo z ; nel miglioramento dell’accuratezza; nell’estensione del campo di visibilità; nella riduzione del *laser speckle*; nel diminuire la dipendenza dalla luce ambientale e dai riflessi (Fig. 1.4d).

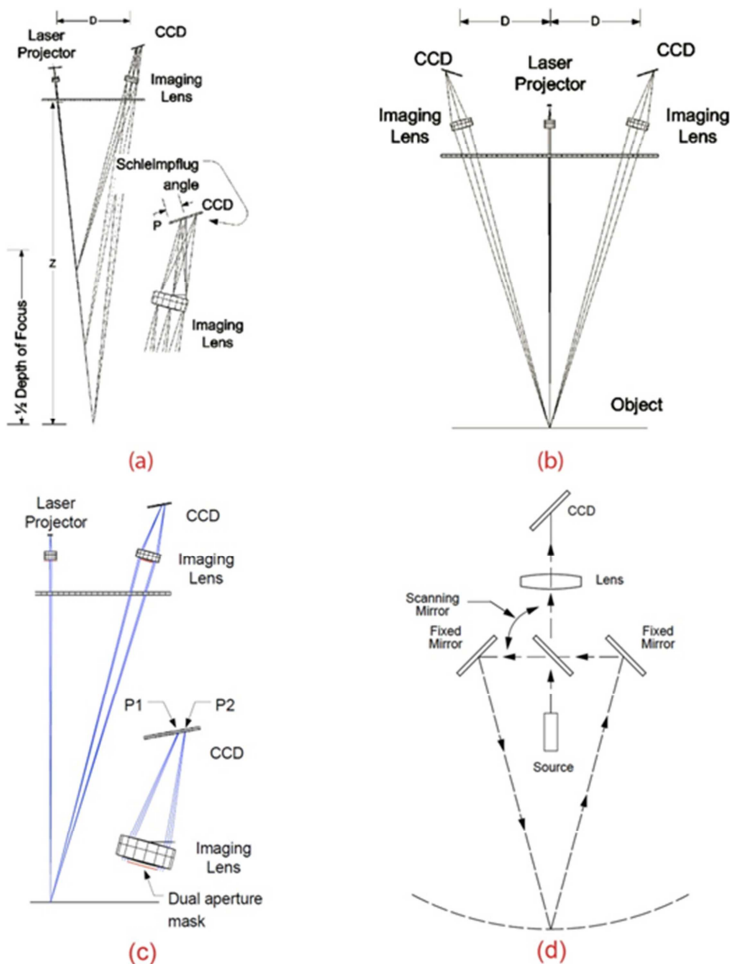


Fig. 1.4 – Sistema che utilizza il principio di Scheimpflug (a); sistema con doppia camera (dual view triangulation) (b); sistema a singola camera con maschera a due aperture (Biris) (c); sistema auto-sincronizzato(d) (NRC Canada).

Un sistema alternativo a quelli sinora visti, basato sempre sulla

triangolazione è caratterizzato dalla *proiezione di pattern*. In questo caso, un videoproiettore emette dei *pattern* luminosi che vengono acquisiti da una camera digitale.

La valutazione delle tre coordinate per ogni *pixel* dell'immagine si basa su come il *pattern* proiettato, conosciuto a priori, si deforma in relazione alla geometria della superficie da scandire.

Se, ad esempio, vengono proiettati dei *pattern* luminosi formati da bande alternate bianche/nere, ognuna di esse può essere considerata al pari di una lama di luce. Inoltre, le bande sono emesse nello stesso istante e, per distinguerle, vengono identificate mediante una codifica binaria (*Gray Code*). Il sistema è conosciuto come proiezione di *pattern* con codifica di Gray (Fig. 1.5).

Un'altra modalità utilizza l'effetto moiré, in questo caso si sfruttano le frange d'interferenza (frange di moiré) che si generano quando due *pattern*, di passo o di orientamento diverso, si sovrappongono¹¹.

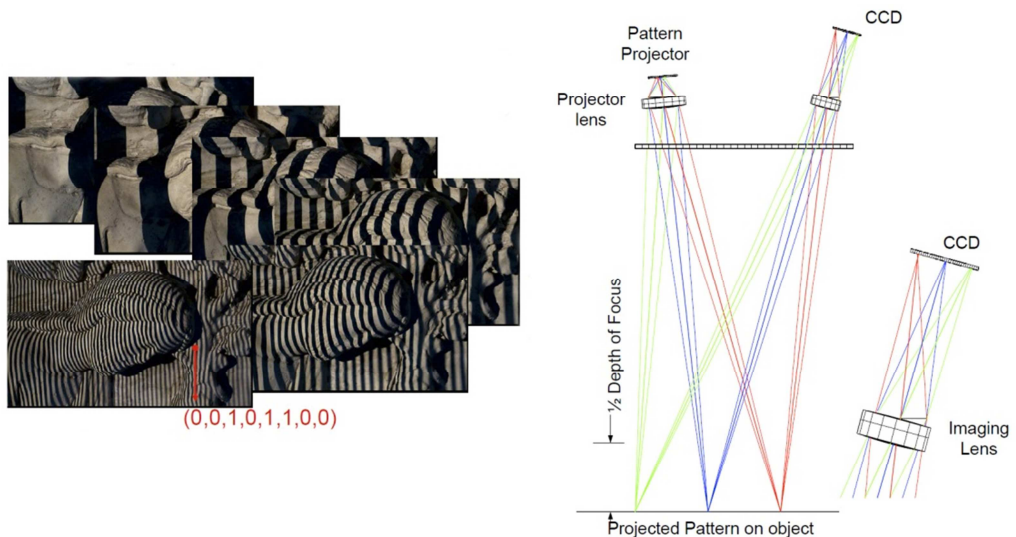


Fig. 1.5 – Alcuni dei *pattern* luminosi della sequenza di Gray e schema di una range camera a luce strutturata (NRC Canada).

I sistemi a proiezione di *pattern* acquisiscono un'area senza bisogno di

¹¹ Le forme dei *pattern* possono essere le più diverse: bande alternate bianche/nere o colorate, cerchi in bianco e nero, griglie rettangolari, *pattern* pseudo-casuali e così via.

nessun ausilio che implementi movimenti meccanici e sono caratterizzati da:

- una risoluzione spaziale in xy (densità di campionamento) correlata alla risoluzione del videoproiettore;
- un'ottima risoluzione lungo z , relativamente a superfici piane (naturalmente non si ha l'effetto *speckle*);
- un'accuratezza paragonabile ai sistemi che utilizzano la sorgente *laser*;
- una profondità di campo minore, rispetto a questi ultimi;
- una velocità di acquisizione elevata (comunque correlata al numero di *pattern* proiettati);
- un campo inquadrato limitato rispetto ai sistemi a lama di luce, che arrivano fino ad un metro cubo;
- una significativa dipendenza dalla luce ambientale rispetto ai sistemi a lama di luce¹²;
- costi dipendenti dal videoproiettore.

A chiusura di questa parte sui triangolatori, riportiamo in figura 1.6 un compendio grafico dei tre metodi presentati (singolo *spot*, lama di luce, proiezione di *pattern*).

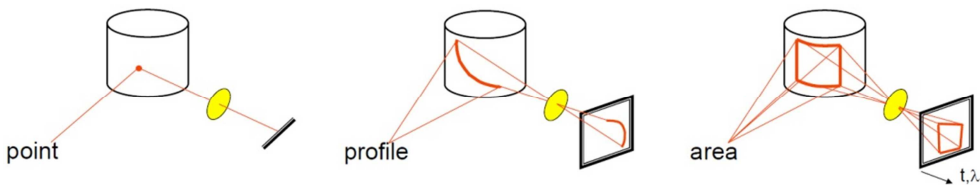


Fig. 1.6 – Compendio grafico dei tre metodi presentati: sistema a singolo *spot*, a lama di luce e a proiezione di *pattern* (da NRC Canada).

Sistemi basati sulla stima del tempo di volo

I sensori a tempo di volo (*time of flight*, TOF), misurano l'intervallo di tempo impiegato dal raggio *laser* per andare dalla sorgente alla superficie e

¹² In presenza di una consistente luce ambientale, diminuisce il contrasto dei *pattern* e si riduce l'accuratezza di misura.

tornare al fotodiode ricevitore¹³. Lo strumento è costituito da una sorgente *laser* e un rilevatore, nonché da un apparato optomeccanico in grado di variare la direzione di puntamento del raggio (tramite la rotazione meccanica della sorgente, la riflessione della luce *laser* mediante specchi, la proiezione del raggio tramite uno specchio rotante o basculante)¹⁴.

In figura 1.7 riportiamo, con la consueta simbologia, lo schema di un *laser scanner* basato sulla stima del tempo di volo.

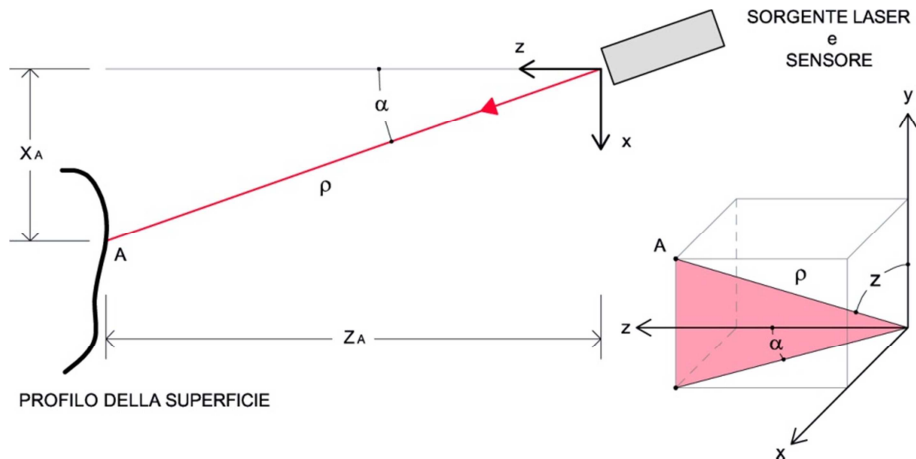


Fig. 1.7 – Schema di laser scanner basato sulla stima del tempo di volo.

Le due coordinate (x_A, z_A, y_A) di un generico punto A posto sulla superficie dell'oggetto, possono essere scritte in funzione della distanza ρ strumento/punto, dell'angolo azimutale α e dell'angolo zenitale z :

$$x_A = \rho \sin(z) \sin(\alpha) \quad (1.7)$$

¹³ In letteratura gli strumenti basati sul principio della misura della distanza sono anche conosciuti con il nome di *Laser Radar* o con l'acronimo LIDAR (*LIght Detection And Ranging*), anche se nell'uso corrente con questo secondo termine si intendono i sistemi TOF aviotrasportati. Usualmente, nel rilevamento architettonico vengono montati su un treppiede fisso, ma possono anche essere montati su apparecchi in movimento (aereo, auto, ...).

¹⁴ Questi sistemi possono essere visti come l'evoluzione della stazione elettronica totale, cioè di un dispositivo che nasce dalla combinazione del teodolite (in grado di misurare angoli) con un distanziometro elettronico (in grado di misurare distanze). L'operazione manuale di puntamento e registrazione del punto traguardato, tipica della stazione totale, viene automatizzata con i sistemi TOF.

$$y_A = \rho \cos(z) \quad (1.8)$$

$$z_A = \rho \sin z \cos(\alpha) \quad (1.9)$$

dove gli angoli α e z sono dati dal dispositivo optomeccanico che orienta il raggio *laser*, mentre la distanza ρ tra la sorgente *laser* e il punto *A* si calcola stimando il tempo di volo.

La stima del tempo di volo può essere fatta, sia in modo diretto che indiretto. Nella *stima diretta del tempo di volo* il contributo luminoso emesso dalla sorgente è di tipo impulsivo (*Pulsed Waves*, PW) e l'intervallo è valutato calcolando il tempo intercorso tra la partenza dell'impulso e il suo ritorno al ricevitore. La distanza coperta dall'impulso luminoso è espressa come prodotto tra la velocità e il tempo dalla seguente formula:

$$2 \rho = TOF \cdot c \quad \text{da cui} \quad \rho = \frac{TOF \cdot c}{2} \quad (1.10)$$

dove: *TOF* è il tempo impiegato dall'impulso per andare e tornare dal bersaglio, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ è la velocità della luce nel vuoto, mentre il coefficiente 2 indica che la distanza ρ tra sorgente e bersaglio è la metà del percorso di andata/ritorno dell'impulso.

Nella *stima indiretta del tempo di volo* è impiegata una radiazione luminosa continua (*Continuous Wave*, CW), la quale viene modulata in ampiezza (*Amplitude Modulation*, AM) o in frequenza (*Frequency Modulation*, FM), per calcolare lo sfasamento tra l'onda emessa e quella riflessa.

I tempi ridotti inducono un'aleatorietà sulla stima del tempo di volo che si traduce in un'incertezza di misura elevata, fino a 20-30 volte maggiore rispetto ad un sistema a triangolazione.

A seconda delle modalità di stima del tempo di volo, distinguiamo due classi di strumenti: i *laser scanner TOF PW* o ad impulsi, che usano la *stima diretta del tempo di volo* e i *laser scanner TOF CW AM* o FM, nel caso di *stima indiretta del tempo di volo*. I primi sono caratterizzati da un elevato *range* d'acquisizione (fino a 2000 m), ma hanno un'accuratezza ed una velocità di scansione inferiore rispetto ai sistemi TOF CW.

1.3 Parametri di funzionamento del laser scanner

Le prestazioni di un sensore a triangolazione o a tempo di volo, dipendono dalle caratteristiche del dispositivo optoelettronico, dalla meccanica dello strumento, nonché dagli algoritmi per ricavare dai dati grezzi le misure delle coordinate.

La conoscenza delle capacità operative di una *range camera* è la premessa necessaria per una scelta adeguata degli strumenti da usare nel rilevamento e quindi la base per una corretta pianificazione.

Pertanto è fondamentale valutare le prestazioni in termini quantitativi attraverso alcuni parametri di funzionamento¹⁵:

- la *risoluzione* (massima), che indica la più piccola variazione della grandezza da misurare che lo strumento è in grado di acquisire, determinando il passo minimo di campionamento;
- l'*accuratezza*, cioè lo scostamento tra il risultato della misurazione e il valore reale (o accettato come tale) del misurando. Essa rappresenta l'errore che si manifesta sistematicamente al ripetersi della misurazione e può essere valutata come differenza tra la media dei dati misurati e il valore reale;
- la *precisione (incertezza)*, cioè un indice della dispersione (σ) delle misure intorno alla loro media e rappresenta la componente aleatoria dell'errore. Si determina come radice quadrata della varianza (deviazione standard, o scarto quadratico medio);

La *risoluzione* indica la maggiore o minore capacità del sistema di scandire nei più minuti dettagli le superfici di un oggetto tridimensionale e, poiché le

¹⁵ Oltre ai tre parametri metrologici riportati, ve ne sono altri che caratterizzano una *range camera*. Una tra queste è la *velocità di acquisizione*, cioè il numero di punti al secondo che il sistema riesce a scandire. Tale velocità notevolmente anche all'interno di una stessa classe di strumenti. Per le *range camera* a luce struttura si può arrivare fino a 200000 punti/s, mentre per quelli a lama di luce, il movimento meccanico abbassa questo valore anche della metà. I *laser scanner* TOF PW sono caratterizzati da una velocità di scansione che varia da 1000 a 100000 punti/s, mentre i sistemi TOF CW AM a rilevamento di fase si spingono fino a 1000000 punti/s.

La risoluzione, l'accuratezza e la precisione, su cui noi ci soffermiamo, rappresentano le caratteristiche salienti di uno strumento, poiché attraverso la loro conoscenza è possibile stabilire la qualità e, quindi, l'affidabilità della misura registrata. La loro definizione, mediante un processo di caratterizzazione, consente di analizzare le prestazioni dello strumento e stabilirne le *performance* in diverse condizioni operative.

caratteristiche dello *scanner* possono dar luogo a valori differenti lungo i tre assi, si è soliti distinguere tra *risoluzione orizzontale* (o *laterale*) e *risoluzione in profondità* (o *lungo z*).

Generalmente, la *risoluzione orizzontale* di uno *scanner* a triangolazione assumere valori differenti lungo gli assi x ed y (pertanto abbiamo una *risoluzione lungo x e lungo y*), mentre nel caso in cui è uguale su entrambi gli assi si definisce *risoluzione lungo xy* ¹⁶.

Consideriamo una *range camera* a lama di luce *laser*, la cui vista laterale e quella dall'alto sono riportate in figura 1.8 e calcoliamo le risoluzioni lungo le due direzioni.

La risoluzione orizzontale lungo y (Δy) può essere calcolata in funzione della distanza Δy_s tra due file orizzontali di *pixel* adiacenti, della focale f e della distanza z , sfruttando i due triangoli simili con vertice nel centro di proiezione O e con basi Δy e Δy_s , mediante la relazione:

$$f : \Delta y_s = z : \Delta y \quad \text{da cui} \quad \Delta y = \frac{z}{f} \Delta y_s \quad (1.11)$$

dalla formula si evince che la risoluzione lungo y è funzione della struttura del CCD, della focale e della distanza tra camera e oggetto.

Al contrario la risoluzione orizzontale lungo x (Δx) dipende solo dal movimento impresso dal dispositivo meccanico alla testa di scansione. Nel caso di traslazione questa coincide con il valore dello spostamento, mentre se ci troviamo di fronte ad una rotazione $d\theta$ possiamo considerare valida la relazione¹⁷:

$$\Delta x = z d\theta \quad (1.12)$$

che lega la risoluzione alla distanza z e all'angolo $d\theta$.

Facendo riferimento allo schema in figura 1.2, la *risoluzione in profondità* (Δz), può essere valutata in funzione della variazione Δp nel seguente modo:

¹⁶ Data una *range map* e note le dimensioni del sensore CCD e dell'area inquadrata, possiamo calcolare a posteriori le risoluzioni lungo x ed y nella maniera seguente:

$\Delta x = \text{larghezza area acquisita} / \text{larghezza sensore};$

$\Delta y = \text{altezza area acquisita} / \text{altezza sensore}.$

¹⁷ Naturalmente la formula è valida (e quindi la risoluzione rimane costante al ruotare della testa di scansione) su una superficie cilindrica teorica di raggio z .

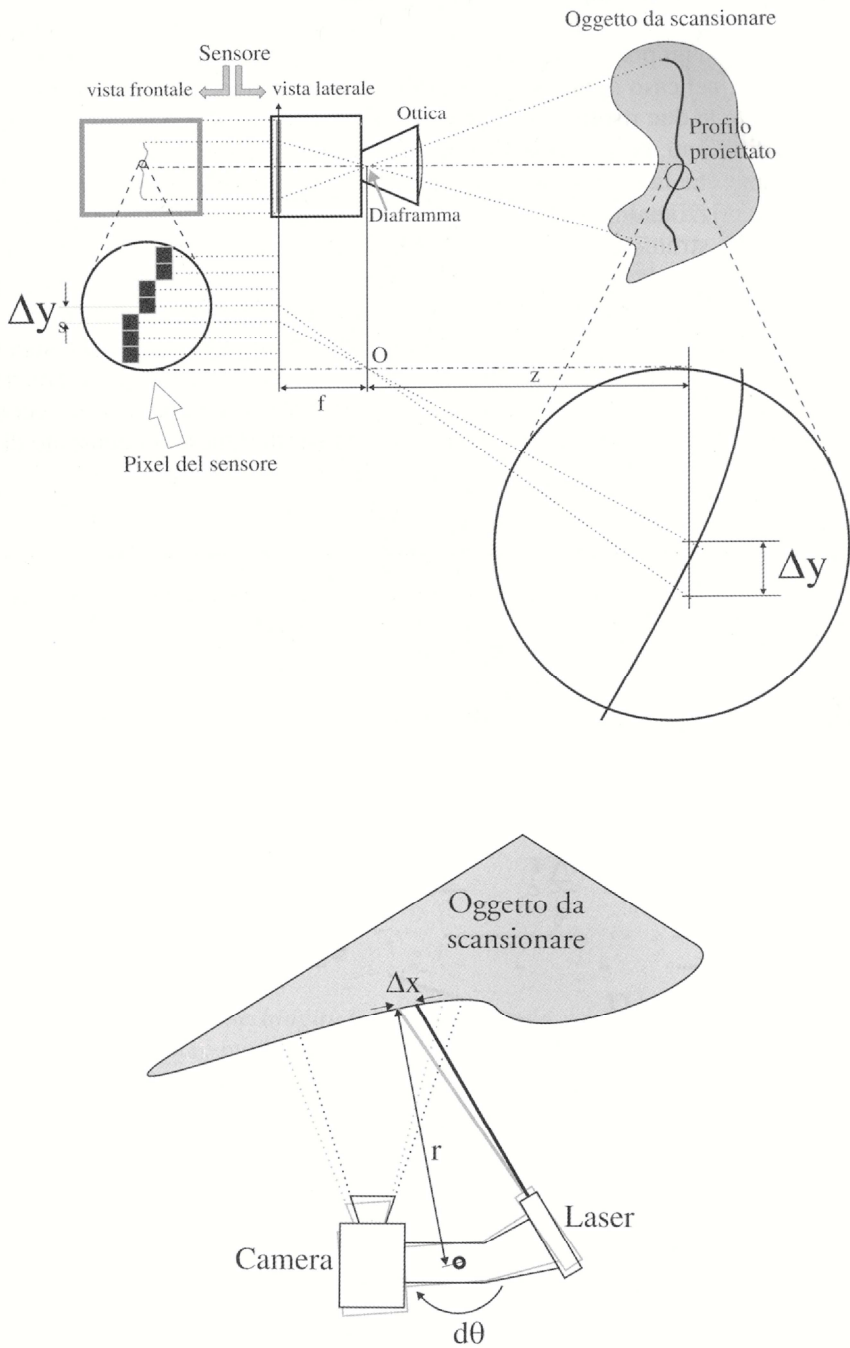


Fig. 1.8 – Schema di range camera a lama di luce laser visto di profilo (in alto) e visto dall'alto (in basso) (G. GUIDI et al., 2010).

$$\Delta z = \frac{\partial z(p)}{\partial p} \Delta p \quad (1.13)$$

dove $\partial z(p)/\partial p$ è la derivata di z rispetto a p .

Considerando la (1.2) e sostituendo in questa la (1.3), la (1.13) diventa:

$$\Delta z = -\frac{z^2}{b \cdot f} \Delta p \quad (1.14)$$

da cui si deduce che la risoluzione lungo z è funzione della distanza tra camera e oggetto, della *baseline*, della focale e della Δp (quest'ultima, a sua volta, è dipendente dalle dimensioni del sensore CCD e dal modo di identificare il picco di luminosità dello *spot* sul sensore).

La risoluzione massima della *range camera* lungo xy è limitata dai fenomeni di diffrazione della luce. La propagazione rettilinea della luce viene perturbata quando l'onda raggiunge un ostacolo o, come nel nostro caso, uno schermo con un foro dalle dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda, i raggi divergono ed interferiscono gli uni con gli altri. Questo provoca due fenomeni: lo *spot laser* si allarga al crescere della distanza in maniera tanto più rapida quanto più piccola è la dimensione del foro¹⁸; una distribuzione non uniforme dell'intensità luminosa nell'area dello *spot*, con una zona centrale a maggior intensità ed un andamento oscillatorio con picchi via via decrescenti spostandosi verso il bordo (Fig. 1.9).

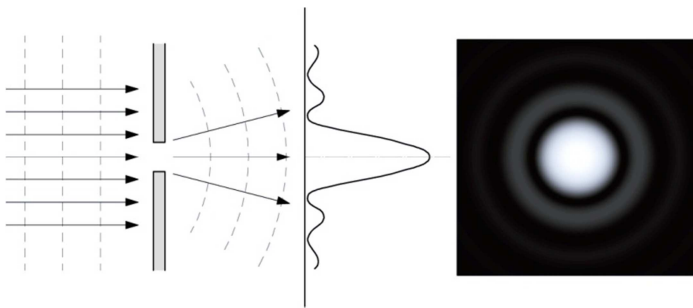


Fig. 1.9 – Fenomeno di diffrazione con conseguente allargamento del raggio e distribuzione non uniforme dell'intensità luminosa nell'area dello *spot*.

¹⁸ La variazione della dimensione dello *spot*, all'interno del *range* d'acquisizione, risulta contenuta nei sistemi a triangolazione, mentre è più rilevante nei sistemi a tempo di volo.

La risoluzione massima lungo xy corrisponde alla massima sovrapposizione possibile di due *spot* senza che questi diventino indistinguibili. A tale scopo, facciamo riferimento al criterio di Rayleigh, cioè ad una regola empirica che si basa sulla capacità risolutiva umana, secondo cui due punti luminosi possono essere distinti fino al limite in cui il picco massimo del primo *spot* coincide con il primo minimo del secondo. Oltre questo limite i due punti non sono più distinguibili.

La risoluzione massima lungo z è limitata dal fenomeno del *laser speckle*. La luce coerente del laser che incide su una superficie otticamente rugosa viene riflessa in tutte le direzioni, tanto da dar luogo ad una serie di contributi che provocano interferenze additive e sottrattive, registrate dal sensore CCD come un'area luminosa caratterizzata da una miriade di macchie chiare e scure distribuite in maniera casuale. Questo artefatto genera un'incertezza nel determinare la posizione dello *spot* sul sensore, che si ripercuote sull'incertezza di misura in z .

Ogni misurazione è una approssimazione del valore “vero” del misurando, infatti la ripetizione delle operazioni di misura su uno stesso campione porta ad avere valori differenti, che oscillano intorno alla misura “esatta” e definiscono un intervallo più o meno limitato. Questa oscillazione è l'effetto di errori sistematici e accidentali.

L'errore sistematico (accuratezza) fornisce l'entità dello scostamento tra misurazione e valore vero e può essere ridotto con un adeguato processo di calibrazione dello strumento. L'errore accidentale (precisione o incertezza di misura) rappresenta il grado di dispersione di una serie di misure intorno al loro valore medio. Questo tipo di errore non può essere ridotto con la taratura dello strumento, né eliminato ma solamente limitato.

L'incertezza di misura di una *range camera* può essere stimata, sia *a priori* mediante una previsione teorica della deviazione standard della distanza z , che *a posteriori*, valutando i dati della scansione di un oggetto appositamente costruito e di cui si conosce a priori la forma (ad esempio un piano rettificato)¹⁹.

¹⁹ La conoscenza a priori dell'incertezza permette di pianificare in maniera adeguata la scansione, fissando la distanza di lavoro e scegliendo la focale per ottenere l'incertezza di misura desiderata; mentre la conoscenza a posteriori serve per valutare la “qualità” del risultato di una scansione.

È possibile scrivere un'equazione generale per descrivere l'incertezza di misura intrinseca lungo z di un *laser scanner* in funzione del rapporto segnale-rumore (*signal-to-noise ratio*, SNR). Nel caso in cui $SNR > 10$ si ha:

$$\sigma_z \approx K \frac{1}{\sqrt{SNR}} \quad (1.15)$$

dove K è una costante che dipende dal metodo di misura dello strumento adoperato. La tabella 1.1 riporta, per ogni metodo, la costante K , il rumore dovuto allo *speckle*, i parametri che limitano il *range* massimo d'acquisizione e i valori tipici dell'incertezza e della profondità di campo (DOF).

Method	Constant K	Speckle noise δ_r	Max range	Typical values
Triangulation	$\frac{Z^2}{f B} \frac{1}{BW}$	$\frac{\lambda}{\pi \sqrt{2}} \frac{Z^2}{B \Phi}$	Limited by the optical geometry	0.02 mm - 2 mm DOF < 4 m @ 10 - 1000 kHz
PW modulation	$\frac{c}{2} T_r$	Affects amplitude	Limited by pulse rate f_p	5 mm - 50 mm DOF > 10 m @ 1 - 250 kHz
AM modulation	$\frac{\lambda_m}{4 \pi}$	Affects amplitude	Limited by frequency f_m	0.05 mm - 5 mm DOF 1-100 m @ 50- 1000 kHz
FM modulation	$\frac{\sqrt{3}}{2 \pi} \frac{c}{\Delta f}$	Affects amplitude	Limited by chirp duration T_m	0.01 to 0.25 mm DOF < 10 m @ 0.01-1 kHz

Tab. 1.1 – Per ogni metodo di misura sono riportati: la costante K , il rumore dovuto allo *speckle*, i parametri che limitano il *range* massimo d'acquisizione e i valori tipici dell'incertezza e della profondità di campo (DOF) (J.-A. BERARDIN, 2009).

I simboli usati nella tabella hanno i seguenti significati: Z distanza tra lo strumento e la superficie, B *baseline*, BW scarto quadratico medio della larghezza di banda del segnale secondo la definizione di Poor, λ lunghezza d'onda del *laser*, Φ diametro di apertura dell'obiettivo, T_r tempo di andata dell'impulso *laser*, λ_m lunghezza d'onda della modulazione d'ampiezza, c velocità della luce nel vuoto, Δf escursione della frequenza, f_p frequenza di pulsazione, f_m frequenza di modulazione.

Per la stima a priori dell'incertezza di uno *scanner* a triangolazione, consideriamo uno strumento calibrato, tale da poter trascurare gli errori sistematici e considerare, come unico contributo, quello aleatorio. Se supponiamo che la distribuzione di probabilità del disassamento p (σ_p) e dell'angolo di proiezione α (σ_α) siano modellabili come variabili aleatorie

gaussiane, la variabile z (funzione di p e α) è anch'essa una variabile aleatoria, la cui deviazione standard rappresenta la stima dell'incertezza di misura lungo la z e può essere espressa con la seguente relazione:

$$\sigma_z^2 \approx \left(\frac{z^2}{f \cdot b}\right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{z}{\cos(\alpha)^2}\right)^2 \sigma_\alpha^2 \quad (1.16)$$

Nel caso di una stima precisa dell'angolo α , il contributo dato dal primo termine della formula (1.16) diventa preponderante, quindi considerando soltanto quest'ultimo, l'incertezza di misura diminuisce:

- all'aumentare della focale f (come conseguenza di questo incremento si ha una diminuzione del campo inquadrato);
- all'aumentare della *baseline* b (in questo caso si ampliano le zone d'ombra e comunque resta il limite del rapporto $z/b=1 \div 5$);
- al diminuire della distanza z (si ampliano le zone d'ombra e si riduce il campo inquadrato);
- al diminuire di σ_p , cioè all'aumentare della precisione con cui viene determinata la posizione dello *spot* sul sensore. La σ_p è limitata dallo *speckle*, dal rumore di natura elettrica (rumore del sensore, rapporto segnale-rumore), dalla forma dei *pixel* del sensore e dal contrasto sulla superficie dell'oggetto²⁰.

In presenza di un SNR elevato, la fonte principale di rumore è rappresentata dall'effetto *speckle*, per cui l'incertezza della posizione dello *spot* è approssimativamente pari a:

$$\sigma_p \approx \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \lambda f_n \quad (1.17)$$

dove f_n è il rapporto focale, cioè il rapporto tra la focale dell'obiettivo (f) e il diametro di apertura dell'obiettivo (Φ), mentre λ è la lunghezza d'onda del *laser*.

Considerando soltanto il primo termine della (1.16) e sostituendo in questa la (1.17), otteniamo:

²⁰ A sua volta, il contrasto dipende dalla luce ambientale, dalla potenza luminosa usata per la misura e dall'inclinazione della superficie (più questa è inclinata rispetto all'asse ottico e maggiore risulta l'incertezza di misura).

$$\sigma_z \approx \frac{\lambda}{\pi\sqrt{2}} \frac{z^2}{b \cdot \Phi} \quad (1.18)$$

Nei *laser scanner TOF PW*, l'incertezza nella stima della misura (σ_z) è data da:

$$\sigma_z \approx \frac{c}{2} T_r \frac{1}{\sqrt{SNR}} \quad (1.19)$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto e T_r il tempo di percorrenza dell'impulso.

Quindi nei triangolatori l'errore cresce proporzionalmente al quadrato della distanza z , a differenza di quanto succede per i sistemi TOF, dove l'errore dipende dalla minore o maggiore precisione dell'elettronica nello stimare il tempo di volo dell'impulso.

Quello che abbiamo visto sinora è la stima dell'incertezza intrinseca di misura, relativa ai sistemi a triangolazione e TOF, ma l'incertezza finale di un processo di acquisizione e modellazione è la risultante di una serie di fattori, come è possibile desumere dal diagramma riportato in figura 1.10.

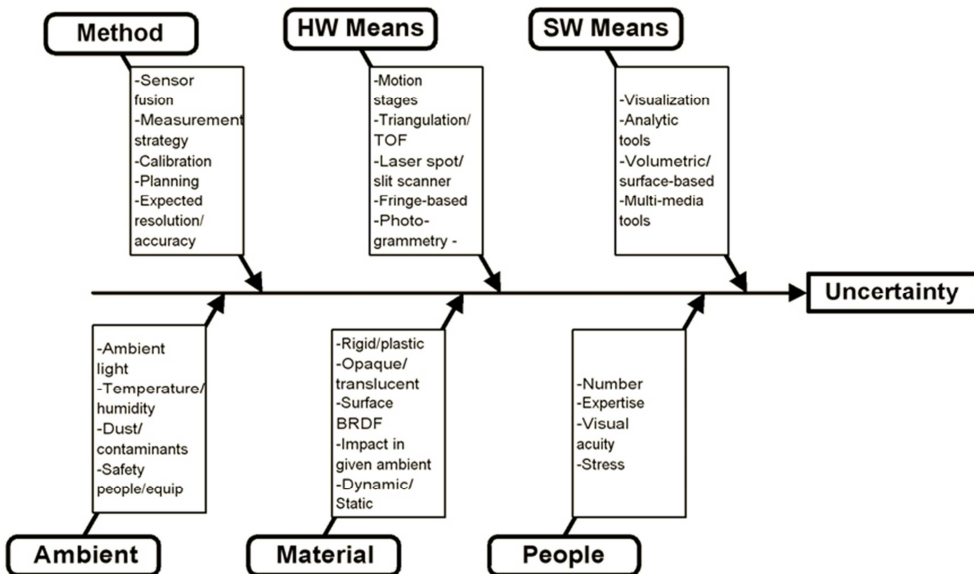


Fig. 1.10 – Fattori che influenzano l'incertezza, sia nell'acquisizione che nella modellazione 3D (NRC Canada).

Sinteticamente possiamo dire che il risultato finale di una scansione è funzione:

- delle tecniche, degli strumenti e dei *software* impiegati;
- del metodo impiegato (strategia di rilevamento, integrazione delle tecniche, calibrazione, ...) e dei parametri di funzionamento di un sistema (risoluzione, accuratezza, incertezza);
- dell'ambiente di lavoro (luce ambientale, temperatura, umidità, ...);
- delle caratteristiche materiche dell'oggetto scandito (tipo di riflessione, opacità, natura traslucida del materiale, ...);
- delle persone e delle loro capacità e competenze specifiche.

1.4 Artefatti della misura

Il termine indica una qualsiasi caratteristica registrata dal sensore che non ha riscontro nella geometria reale della superficie investigata, ma è il risultato di particolari situazioni. Di seguito esponiamo alcuni esempi di artefatti prodotti da forti variazioni cromatiche, da particolari discontinuità della superficie e dalla natura traslucida del materiale.

Il primo caso è quello degli *artefatti dovuti a forti variazioni cromatiche*, che inducono uno sbalzo significativo nella riflettanza (ad esempio il passaggio dal bianco al nero). In questi casi, i sistemi a triangolazione registrano un salto fittizio di quota nel punto di passaggio tra i colori, nonostante le due aree siano complanari. L'errore è proporzionale all'intensità luminosa impiegata ed è dovuto ad una errata stima della posizione dello *spot* sul sensore.

In figura 1.11 riportiamo la scansione di un foglio di carta con la scritta "2D" in nero su sfondo bianco (a). Il foglio, applicato su un supporto piano (vetro), è scandito con un Minolta Vivid 910 ad una risoluzione orizzontale di 0,2 mm a 70 cm di distanza, per un campo inquadrato di 13x9,6 cm. Benché il supporto sia piano, la *range map* in ombreggiatura sintetica mostra dei rilievi lungo i bordi della scritta (b); allo stesso tempo, la sezione (fatta lungo il piano individuato dalla traccia bianca sulla *range map*) illustra l'entità dei rilievi in

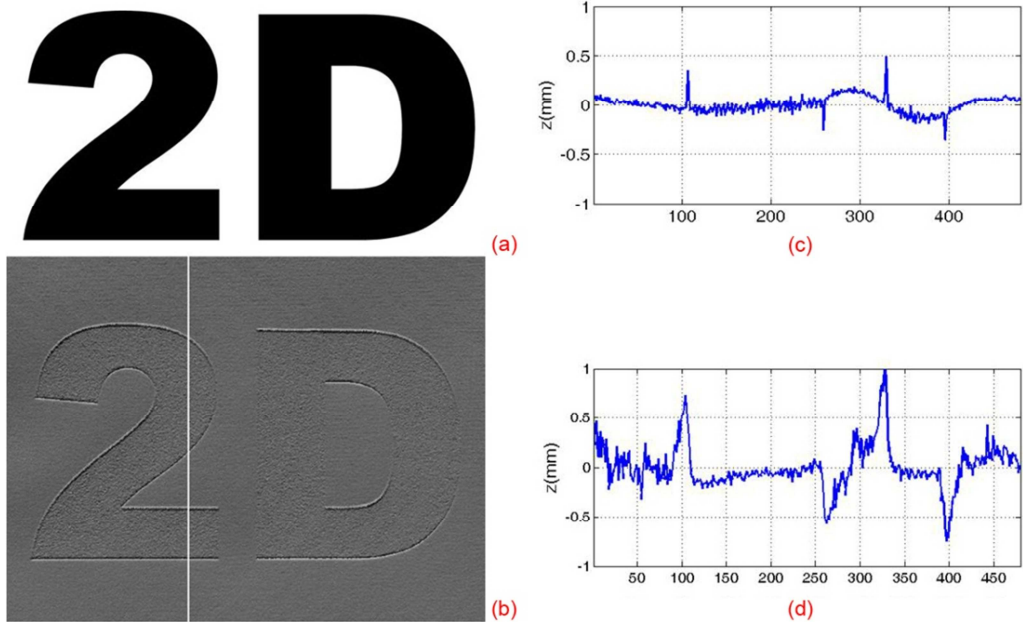


Fig. 1.11 – *Artefatti dovuti a forti variazioni cromatiche.* In questi casi, i sistemi a triangolazione registrano un salto fittizio di quota nel punto di transizione tra i colori, anche se le due aree sono complanari. L'errore è proporzionale all'intensità luminosa utilizzata ed è dovuto ad una errata stima della posizione dello *spot* sul sensore (G. GUIDI et al., 2010).

termini numerici evidenziando l'aumento del rumore nel passaggio da un'intensità luminosa ottimale (c)²¹ ad una venti volte superiore (d).

L'entità dell'errore dipende anche dalla differenza di riflettanza tra le due regioni adiacenti. I due schemi in figura 1.12 mostrano come la differenza di riflettanza (ρ_1, ρ_2) tra due aree limitrofe, provoca un errore nella misura quando lo *spot* incide proprio in corrispondenza della transizione, spostando verso sinistra (cioè verso l'area con riflettanza maggiore) la stima della sua posizione, in misura tanto maggiore, quanto più alta è la differenza di riflettanza.

Tra le prove sperimentali, condotte con sistemi TOF per determinare l'influenza del colore di una superficie sulla qualità della misura, è esemplare quella fatta da Kersten et al. (2007) con 22 fogli diversamente colorati²². I fogli

²¹ In questo caso i picchi emergono rispetto ai valori dell'incertezza di misura, ma sono comunque inferiori a 0,5 mm.

²² T. P. KERSTEN, K. MECHELKE, M. LINDSTAEDT, *Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems*, in A. GRUEN,

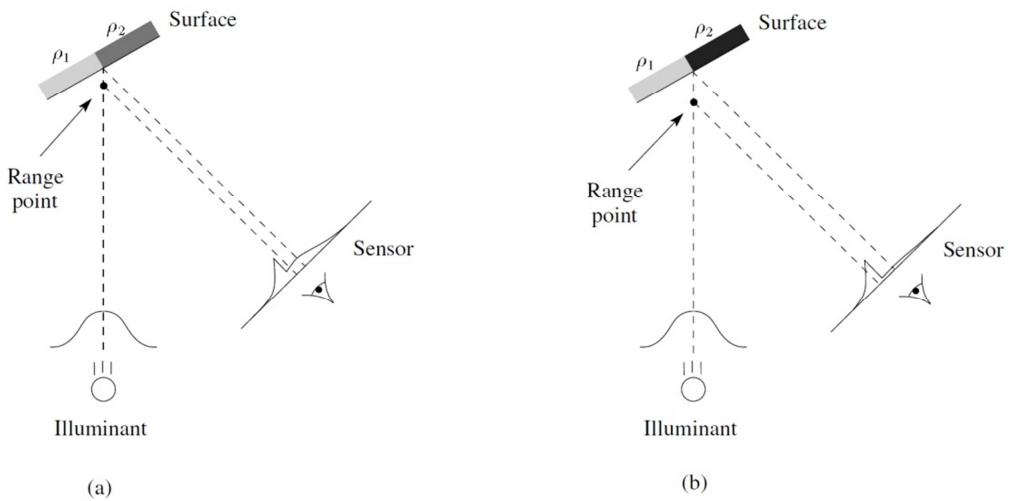


Fig. 1.12 – *Influenza della riflettanza sull'entità dell'errore*. L'errore nella stima della posizione dello spot è minore nello schema di sinistra, dove la differenza di riflettanza tra le due aree adiacenti è inferiore; mentre aumenta nello schema di destra, dove il divario è maggiore (B. L. CURLESS, 1997).

sono acquisiti con una risoluzione di 3 mm ad una distanza di 10 m, mantenendo la direzione di scansione perpendicolare alla loro superficie. Successivamente è stato costruito un piano di *best-fitting* che approssima la nuvola di punti ottenuta dalla scansione di ogni foglio.

La figura 1.13 riporta le variazioni nella stima della distanza z tra lo scanner²³ e il centro dei piani di *best-fitting* dei fogli colorati (grafico in alto) e il rapporto tra l'intensità del rumore e il colore (grafico in basso). Dai grafici si desume che la distanza z subisce delle variazioni generalmente poco significative, sia in funzione dello scanner che del colore, eccezion fatta per il Faro LS880 e il Trimble GX. Inoltre, il colore non ha un'influenza rilevante sulla quantità di rumore e, in particolare, lo scanner Z+F Imager 5006 mostra dei livelli di rumore inferiori rispetto agli altri, cosa che gli autori dello studio ipotizzano possa dipendere dal filtraggio dei dati acquisiti.

H. KAHMEN (a cura di), in Proceedings of "VIII Conference on Optical 3-D Measurement Techniques", Zurigo (Svizzera), 9-12 luglio 2007, pp. 319-328.

Per lo studio dell'accuratezza dei sistemi TOF si veda anche W. BOEHLER, A. MARBS, *Investigating Laser Scanner Accuracy*, 2005.

²³ L'esperimento è condotto con *laser scanner* a differenza di fase (Faro LS880 e Z+F Imager 5006) e ad impulsi (Trimble GX e Leica Scanstation).

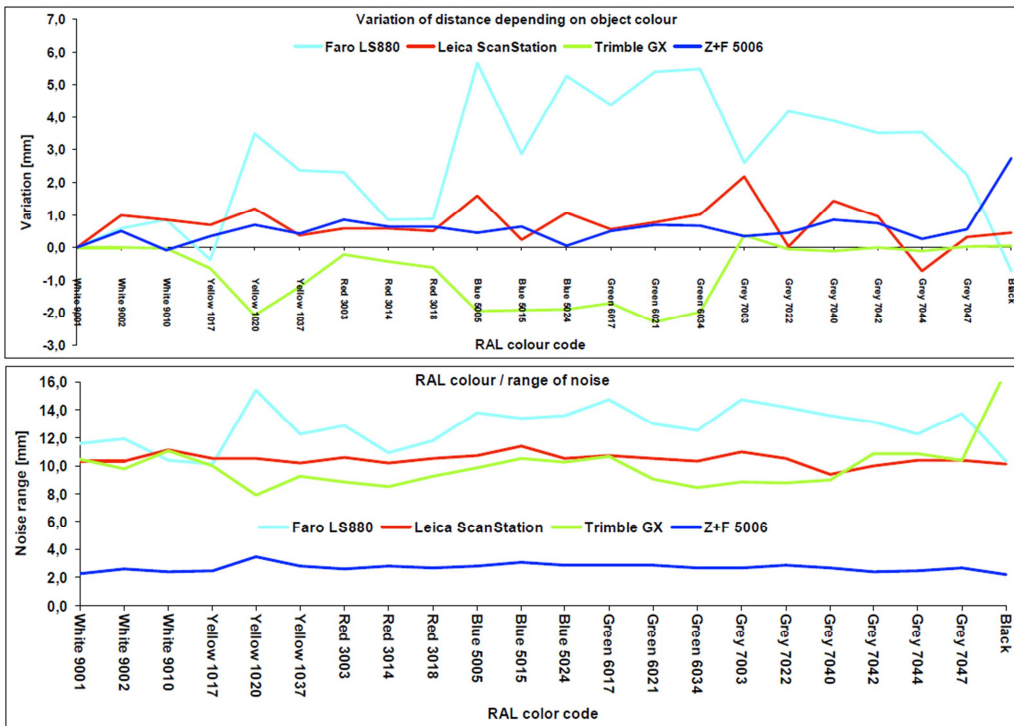


Fig. 1.13 – Prove sperimentali, condotte con sistemi TOF, per determinare l’influenza del colore di una superficie sulla qualità della misura: variazioni nella stima della distanza tra lo scanner e il centro dei piani di best-fitting dei fogli colorati (grafico in alto), rapporto tra l’intensità del rumore e il colore (grafico in basso). Dai grafici si desume che la distanza z subisce delle variazioni generalmente poco significative, sia in funzione dello scanner che del colore, eccezion fatta per il Faro LS880 e il Trimble GX. Inoltre, il colore non ha un’influenza rilevante sulla quantità di rumore e, in particolare, lo scanner Z+F 5006 mostra dei livelli di rumore inferiori rispetto agli altri (T. P. KERSTEN et al., 2007).

Il secondo caso è relativo agli *artefatti dovuti a particolari discontinuità della superficie*, cioè alla presenza di dislivelli improvvisi, di bruschi cambiamenti nell’orientamento della superficie, ..., che incidono sul modo in cui la posizione dello *spot* viene rilevata dal sensore e possono dar luogo a misurazioni non corrette.

In figura 1.14 sono illustrati tre possibili casi (relativi ad un sistema a triangolazione): due dovuti all’incidenza dello *spot* su uno spigolo (discontinuità della superficie) e il terzo causato da una particolare conformazione dell’oggetto, che nasconde al sensore una parte della luce riflessa. In particolare, la geometria del primo caso (a) porta a sovrastimare la distanza, mentre quella degli altri due (b e c), a sottostimarla.

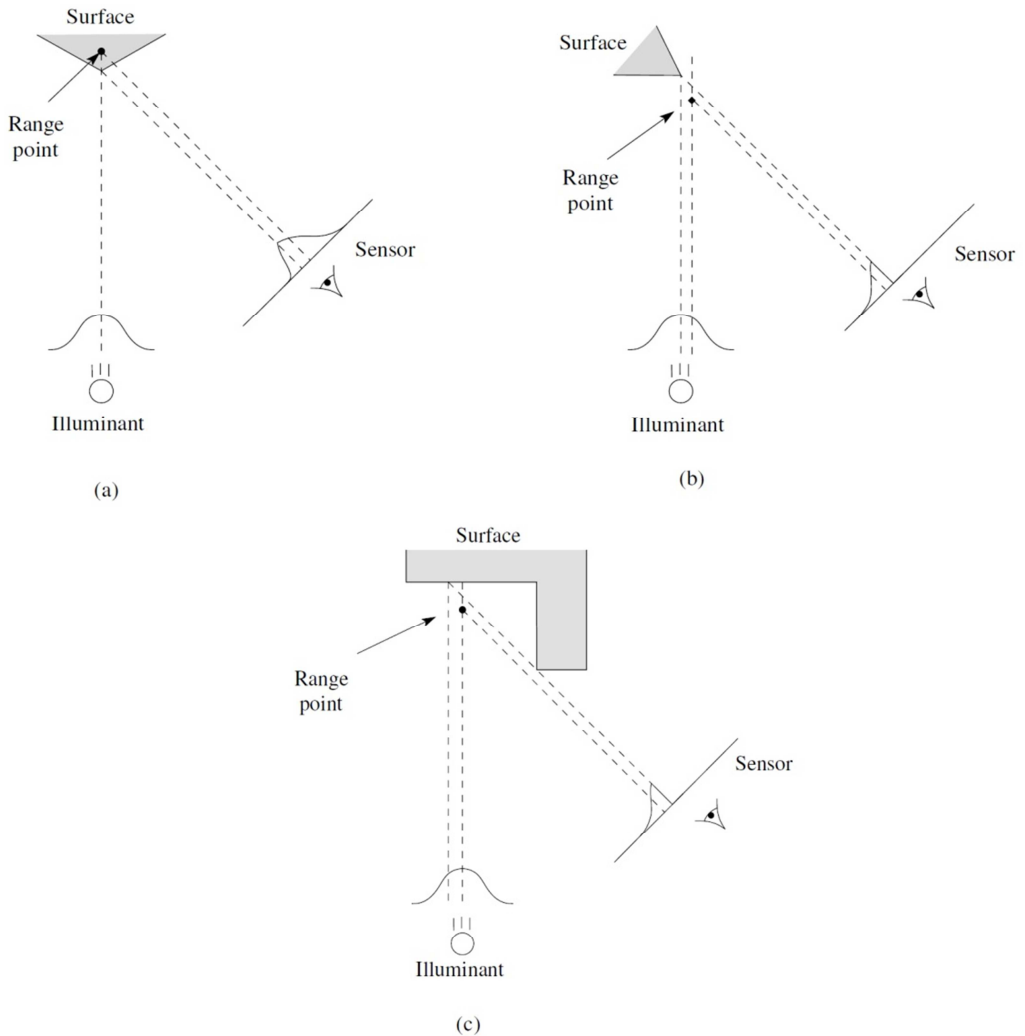


Fig. 1.14 – *Artefatti dovuti a particolari discontinuità della superficie*. I primi due (a, b) sono dovuti all'incidenza dello *spot* su uno spigolo (discontinuità della superficie), mentre il terzo è causato da una particolare conformazione dell'oggetto che nasconde al sensore una parte della luce riflessa (B. L. CURLESS, 1997).

In figura 1.15 è esemplificata la situazione in cui vi è un forte dislivello tra due piani: si ha una corretta individuazione della posizione dello spigolo, soltanto nell'ipotesi di eguale suddivisione dello *spot* (al centro), mentre nelle altre due si ha una valutazione errata del suo baricentro (in alto e in basso).

In ultimo presentiamo gli *artefatti dovuti ad un materiale traslucido*. La luce *laser* che incide sulla superficie traslucida viene in parte riflessa e in parte

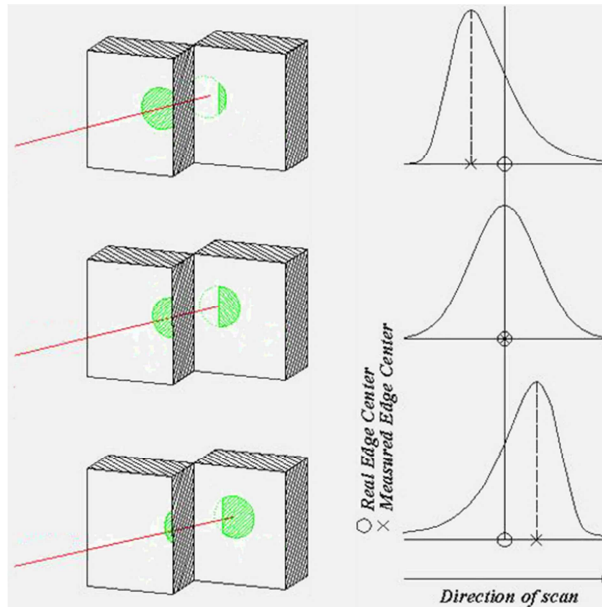


Fig. 1.15 – Artefatti dovuti alla presenza di distlivelli improvvisi della superficie. Particolari discontinuità della superficie possono “spezzare” lo spot e dar luogo a misurazioni non corrette (G. GUIDI).

diffusa all’interno del materiale, con conseguenti errori nella misura.

Un esempio di materiale traslucido è il marmo, le cui caratteristiche di traslucidità e la microstruttura cristallina non omogenea danno origine, da un lato, ad un alone attorno allo *spot*, con conseguente diminuzione della precisione nella stima della posizione dello *spot* stesso; dall’altro, ad una seconda riflessione, che si sovrappone alla prima e tende a spostare la stima della posizione dello spot verso l’interno del materiale²⁴ (Fig. 1.16).

Il livello di rumore cambia in funzione della finitura e del degrado superficiale del marmo: le superfici più scabre e rugose, quelle che non presentano alterazioni dovute agli agenti atmosferici, o su cui si sono formate patine opacizzanti, permettono di minimizzare gli errori di misura, sia in termini di rumore che di spostamento dello *spot*. Infine, bisogna ricordare che

²⁴ Per studi relativi a marmi differenti scanditi con sistemi a triangolazione e TOF segnaliamo due pubblicazioni: B. BENEDETTI, M. GAIANI, F. REMONDINO (a cura di), *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa Edizioni della Normale, 2010, pp. 119-161; G. GODIN, M. RIOUX, J.-A. BERARDIN, M. LEVOY, L. COURNOYER, F. BLAIS, *An assessment of laser range measurement on marble surfaces*, in Proceedings of “V Conference on Optical 3D Measurement Techniques”, Vienna (Austria), 1-4 ottobre 2001, pp. 49-56.

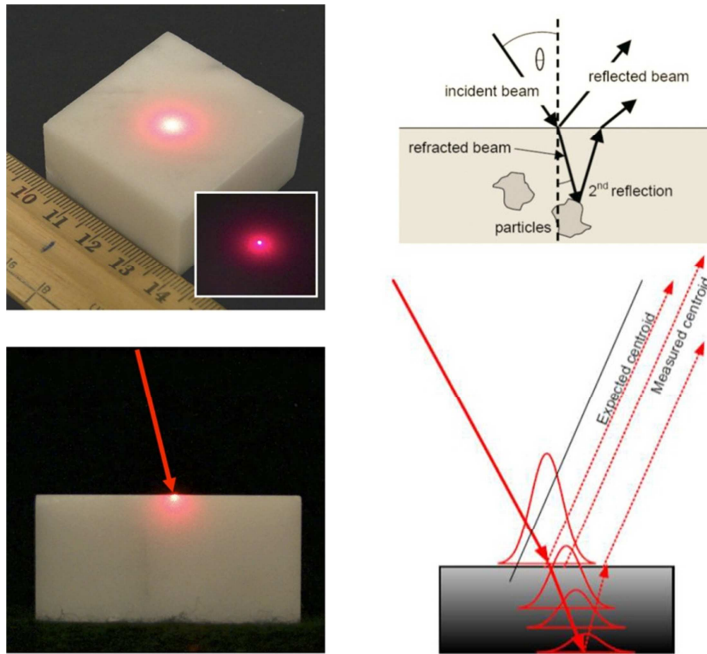


Fig. 1.16 – *Artefatti dovuti alla penetrazione del raggio laser nel marmo.* traslucidità e la microstruttura cristallina non omogenea danno origine, da un lato, ad un alone attorno allo *spot*, con conseguente diminuzione della precisione nella stima della posizione dello *spot* stesso (immagini a sinistra); dall'altro, ad una seconda riflessione, che si sovrappone alla prima e tende a spostare la stima della posizione dello *spot* verso l'interno del materiale (immagini a destra) (NRC Canada).

maggiore è la potenza luminosa del raggio *laser* e più in profondità penetra la luce, cosa che produce un aumento del rumore.

1.5 Annotazioni sull'iter di costruzione del modello poligonale

Il processo di costruzione del modello digitale tridimensionale continuo, a partire dai dati acquisiti tramite *range camera*, può organizzarsi secondo una serie di fasi successive, sintetizzate in figura 1.17 e illustrate in questo paragrafo²⁵.

²⁵ Di seguito analizziamo i passaggi necessari per ricostruire un modello 3D da più scansioni, delineandone le peculiarità senza immergerci appieno nei particolari tecnico-operativi, con la



Fig. 1.17 – Diagramma di flusso del processo di modellazione tridimensionale.

La *pianificazione della campagna d'acquisizione* e quindi la definizione della strategia più appropriata per l'*acquisizione dei dati*, è funzione del tipo di manufatto, della sua minore o maggiore complessità, delle caratteristiche materiche e geometriche, ma anche delle contingenze operative proprie di ogni rilevamento (porzioni di manufatto non accessibili, condizioni ambientali, ...).

A queste istanze è necessario affiancare anche una ponderata riflessione sulle finalità del modello 3D, che vogliamo ottenere con il processo di acquisizione e modellazione. Infatti, sulla scorta degli obiettivi del rilevamento, si deve – altresì – decidere il grado di qualità metrica e di verosimiglianza (risoluzione, accuratezza e incertezza), cioè il “tasso di aderenza” del modello digitale al manufatto reale.

consapevolezza che la conoscenza approfondita delle tecniche e delle procedure è una delle basi su cui poggia la qualità della modellazione e quindi del rilevamento (anche se dall'una non discende automaticamente l'altra).

Anche il tipo di strumenti e la scelta delle tecniche da usare devono essere adeguati alle peculiarità del soggetto e alle finalità del processo di conoscenza inverato dal rilevamento. Oltretutto, soltanto tenendo presenti i fini prefissati è possibile controllare la tendenza all'autonomia della tecnica, ossia la spinta ad imporre i propri "obiettivi" come fini ultimi, al cui perseguimento vengono subordinati tutti gli altri.

Il rilevatore pianifica l'acquisizione, ottimizzando le procedure secondo criteri di efficacia dei risultati e di rapidità, stabilendo: il numero minimo e la posizione della *range camera* per costruire un modello completamente campionato²⁶, il passo di campionamento teorico²⁷ in funzione della parte da acquisire, la procedura di unione per minimizzare l'errore di allineamento e l'integrazione con altre tecniche ottiche di misura 3D e/o con gli altri strumenti correntemente impiegati nel rilevamento e così via (Fig. 1.18).



Fig. 1.18 – Visualizzazione delle 297 posizioni della *range camera*, impiegate per definire compiutamente la statua della Minerva di Arezzo (Visual Computing Lab, ISTI-CNR).

²⁶ Ogni singola scansione rappresenta una porzione dell'oggetto, o meglio, una campionatura della superficie visibile da una specifica inquadratura. Pertanto, per ottenere un modello tridimensionale completo, l'oggetto va scandito da più punti di vista, in modo da non presentare lacune nella superficie dovute a zone d'ombra.

²⁷ Se consideriamo un sistema con un campo visivo sferico, il termine "teorico" sottolinea che il passo di campionamento impostato è costante solo sulla sfera di raggio prefissato che ha come centro lo *scanner*, mentre in realtà la matrice di acquisizione reale varia in funzione della distanza a cui si trova la superficie da riprendere.

Il risultato di un'acquisizione tridimensionale è un modello costituito da una serie di punti che descrivono l'oggetto mediante una codifica discreta delle superfici. Per ogni punto acquisito viene registrata una terna di coordinate cartesiane, le tre coordinate colorimetriche RGB (se lo strumento è dotato di una fotocamera digitale, o ne prevede l'integrazione) e, nel caso di alcuni *scanner*, anche il valore della riflettenza.

I punti sono organizzati a formare una matrice, che nel caso dei sistemi a triangolazione viene detta *range map*, mentre per i *laser scanner TOF* si utilizza abitualmente il termine di “nuvola di punti”.

A queste due fasi segue un *pre-processamento*, ossia un filtraggio dei dati acquisiti, con l'obiettivo di:

- eliminare i punti che non appartengono all'oggetto scandito;
- sftlire i punti per diminuire localmente la risoluzione (ad esempio, su superfici fondamentalmente piane);
- ricampionare i punti per avere una distribuzione uniforme dei punti;
- modificare i punti che presentano un errore di misura non compatibile con le caratteristiche geometriche e materiche dell'oggetto fisico.

Il *laser scanner* acquisisce milioni di punti senza alcun tipo di interpretazione e comprensione preventiva dell'opera, la cui materialità viene scomposta e registrata in maniera acritica in un *database* senza distinguere fra gli elementi dell'architettura in esame e gli oggetti presenti sulla scena (pluviali, alberi, ...). Per cui nasce l'esigenza di procedere all'eliminazione manuale, oppure mediante algoritmi semiautomatici o automatici, dei dati “estranei” all'architettura scandita.

Inoltre, gli algoritmi di filtraggio vengono applicati anche per modificare gli artefatti di misura e, in generale, quei dati che non superano determinate soglie di accuratezza e precisione.

La pulizia (rimozione degli elementi estranei all'architettura, delle incoerenze di bordo, ...) può essere fatta prima o dopo l'allineamento delle scansioni, ma comunque sempre prima dell'eventuale allineamento globale finale, poiché la presenza di dati incoerenti può peggiorare la qualità della registrazione.

I punti di una singola scansione hanno un proprio sistema di riferimento locale, l'*allineamento* (o registrazione) consente di riportare le scansioni ad un

unico sistema di riferimento globale. Questa operazione può essere condotta utilizzando diversi approcci, a seconda dello strumento utilizzato per l'acquisizione e dell'oggetto scandito.

Un approccio comunemente usato a scala architettonica, con *dataset* provenienti da sistemi TOF, consiste nel "guidare" l'allineamento mediante particolari *target* posizionati in maniera efficace sulla scena da riprendere. I *target* più comuni hanno determinate caratteristiche di riflettanza, diffusività e forma, tali da poter essere riconosciuti in maniera semiautomatica dal *software* che gestisce il sistema d'acquisizione. Sono di questa natura i *target* piani ad elevata riflettanza della Leica Geosystem, che vengono identificati dal *software* proprietario *Cyclone*, il cui algoritmo interno calcola la posizione del vertice come centro dell'area circolare presente sul bersaglio e di raggio noto.

I *target*, oltre ad essere acquisiti dallo *scanner* e riferiti al sistema di coordinate locali della scansione, devono essere battuti anche da una stazione totale, in modo da essere inseriti in un sistema di riferimento globale²⁸. Infine, le singole prese vengono rototraslate rigidamente sul sistema di riferimento globale realizzato con l'appoggio topografico.

Se i *target* hanno una distribuzione spaziale uniforme in tutta la scena e il loro numero è maggiore di tre (numero minimo necessario), è possibile ottenere un errore di allineamento contenuto.

Per volumetrie articolate e strutture complesse di grandi dimensioni, casi tutt'altro che infrequenti in architettura, questo modo di procedere risulta efficiente, sia dal punto di vista della qualità metrica della registrazione, che per la rapidità con cui il *software* calcola la matrice di rototraslazione; inoltre non è necessario avere sovrapposizioni tra scansioni, con un conseguente risparmio di tempi d'acquisizione e di "grandezza" del *database* finale.

Di contro, per raggiungere un errore accettabile è essenziale una corretta disposizione dei *target* sulla scena, cosa che risulta complicata in molte situazioni (ad esempio, in ambienti che si sviluppano prevalentemente in altezza) e che comporta un impegno aggiuntivo sul campo.

Un ulteriore approccio sfrutta le forme stesse dell'oggetto (presenti in

²⁸ In molti casi è auspicabile che i *target* vengano battuti da una poligonale d'appoggio preferibilmente chiusa per compensare gli errori. Oltretutto, se le prestazioni lo consentono, i bersagli possono essere misurati anche dallo stesso *scanner*.

scansioni fatte da punti di vista differenti) come riferimenti per l'allineamento. Per questo è necessario che vi sia una zona di sovrapposizione fra prese adiacenti oscillante, solitamente, tra 30÷40%, indispensabile per raggiungere un'accuratezza elevata.

La registrazione delle scansioni viene fatta tramite algoritmi semiautomatici che richiedono un allineamento preliminare manuale, successivamente raffinato con un allineamento globale automatico. Tra questi, l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) è quello maggiormente usato dai *software* commerciali e su cui esiste una vasta letteratura scientifica.

Nell'allineamento preliminare l'operatore identifica manualmente una serie di punti omologhi (almeno tre) appartenenti ad una coppia di scansioni, per calcolare la matrice di rototraslazione tra i due sistemi di riferimento.

Nell'allineamento globale, partendo dai valori di rototraslazione determinati nella precedente fase, il *software* minimizza con un procedimento iterativo la distanza media tra le riprese, utilizzando tutte le scansioni (in pratica viene ridotto l'errore residuo distribuendolo tra tutte le scansioni).

Attualmente i due più diffusi algoritmi ICP si basano sul metodo punto-punto e su quello punto-piano. Il primo consiste nel cercare il minimo della somma dei quadrati delle distanze tra punti corrispondenti (cioè della coppia formata da un punto di una scansione e quello più vicino appartenente all'altra). Il secondo metodo minimizza la distanza tra un punto appartenente ad una prima scansione e il piano tangente al suo corrispondente nella seconda scansione, secondo la direzione normale al punto della prima scansione (Fig. 1.19).

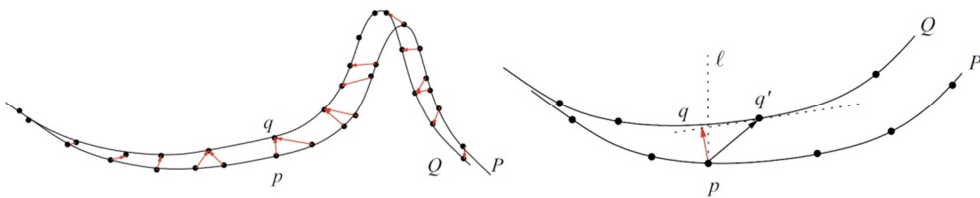


Fig. 1.19 – Schematizzazione del metodo punto-punto (a sinistra) e punto-piano (a destra) (F. BERNARDINI, H. RUSHMEIER, 2002).

Nel metodo punto-piano, la convergenza verso il minimo è più veloce e permette di raggiungere dei risultati migliori nel caso di nuvole di punti non

strutturate; mentre il metodo punto-punto è consigliabile quando le zone di sovrapposizione sono piane, o hanno una curvatura costante²⁹.

Quindi, in questo secondo approccio bastano le *feature* naturali individuabili direttamente sulle scansioni, senza nessun aggravio di lavoro imposto dal posizionamento e dall'acquisizione dei *target*; nel contempo, però, bisogna avere specifiche accortezze nella pianificazione della campagna (adeguata sovrapposizione tra scansioni, presenza di *feature* tridimensionali nelle zone di sovrapposizione, risoluzione e accuratezza opportuna perché si possano identificare correttamente le corrispondenze) ed essere consapevoli del maggior tempo ed onere computazionale necessari per l'elaborazione in fase di registrazione.

Se per volumi complessi ed estesi (ad esempio i manufatti architettonici) è consigliabile usare l'allineamento guidato, quando si tratta di registrare *range map* provenienti da sistemi a triangolazione, cioè quando sono in gioco volumi limitati, conviene utilizzare questo secondo approccio.

In realtà, l'uso di un approccio non esclude l'altro, anzi vi sono delle circostanze operative in cui entrambi vengono integrati per utilizzare al meglio le potenzialità di ognuno di essi.

Nelle situazioni in cui non è possibile collocare i *target* in maniera da coprire efficacemente tutto il volume scandito e l'esito dell'allineamento guidato risulta non accettabile, è possibile ridurre l'errore considerando questo come pre-allineamento, a cui far seguire un allineamento globale automatico tramite ICP.

Anche l'uso della fotogrammetria può tornare utile per vincolare l'allineamento delle *range map* di manufatti dal volume limitato ma con una forma tale da richiedere particolari accortezze. In questi casi, le coordinate di una serie di *target* sono acquisite tramite fotogrammetria e definiscono un sistema di riferimento globale. Gli stessi *target* sono scanditi da una *range camera* a triangolazione, insieme ad una porzione dell'oggetto e riferiti ad un sistema locale. Successivamente si registrano correttamente queste scansioni nel sistema globale, mediante le coordinate dei *target*, quindi si bloccano e su

²⁹ L'algoritmo ICP punto-piano opera in maniera più rapida nel caso della registrazione di *mesh* piuttosto che in quella di nuvole di punti, poiché utilizza le informazioni estratte dai triangoli.

queste vengono allineate tutte le altre prese dell'oggetto fatte con la *range camera*.

È d'obbligo annotare che, indipendentemente dal tipo di approccio, la qualità dell'allineamento è il risultato di una serie di fattori, quali:

- la qualità metrica del dato in *input*, che dipende dalle caratteristiche dello strumento (risoluzione, accuratezza, precisione), dall'esperienza dell'operatore, dalla pianificazione del progetto di presa, dalle caratteristiche dell'oggetto (geometriche, formali e materiche) e dalle condizioni ambientali (illuminazione, ...);
- il tipo di algoritmo implementato dal *software* d'allineamento;
- l'esperienza dell'operatore nell'individuare i punti omologhi per l'allineamento preliminare (anche se l'incidenza sul risultato finale è sostanziale solo se l'errore di registrazione della fase manuale è elevato);
- la forma dell'oggetto. Infatti la presenza di *feature* consente una migliore riconoscibilità dei punti (sia da parte dell'operatore che dell'algoritmo), mentre le superfici chiuse su se stesse permettono la compensazione dell'errore a differenza di quelle prevalentemente mono e bidimensionale.

La *generazione della mesh* rappresenta la transizione dal modello discreto della nuvola di punti a quello poligonale continuo della *mesh*, formato da un reticolo di poligoni interconnessi i cui vertici sono i punti acquisiti.

È necessario precisare che a seconda del sistema di scansione e delle sue modalità di funzionamento, si ottengono differenti strutture nell'organizzazione dei punti. In figura 1.20 sono illustrate tre diverse discretizzazioni di una superficie, diretta conseguenza del modo di scandire.

Nel primo esempio (a), la griglia regolare è prodotta da un sistema a triangolazione in grado di traslare lungo due direzioni. La seconda griglia (b) è il risultato di un sensore montato o collegato ad un braccio meccanico ed azionato manualmente. In questo caso i punti sono organizzati secondo linee preferenziali a definire dei profili della superficie e i diversi passaggi di scansione possono dar luogo a percorsi che si intersecano. Ne deriva una nuvola di punti "non organizzata". Nel caso in cui alla testa di uno *scanner* a lama di luce viene impressa una traslazione o una rotazione, si ottengono delle linee di scansione disposte in maniera regolare (c).

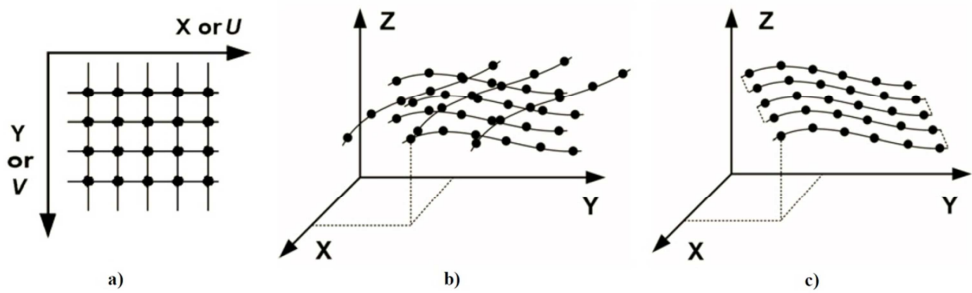


Fig. 1.20 – Tre diverse organizzazioni della nuvola di punti. La griglia regolare è prodotta da un sistema a triangolazione in grado di traslare lungo due direzioni (a); nuvola di punti non organizzata, risultato di un sensore montato o collegato ad un braccio meccanico ed azionato manualmente (b); nuvola di punti organizzata da un sistema in cui alla testa dello scanner a lama di luce viene impressa una traslazione o una rotazione (c) (J.-A. BERALDIN, 2009).

In base alla struttura, possiamo distinguere due categorie di nuvole di punti: quelle “strutturate”, descritte negli esempi (a) e (c), e quelle “non strutturate” dell’esempio (b). Una distinzione non da poco, poiché l’organizzazione dei punti incide in maniera sostanziale sulla generazione della *mesh*³⁰.

Una nuvola di punti strutturata è organizzata secondo una griglia spaziale regolare. In questo primo caso la trasformazione della nuvola in *mesh* è praticamente automatica³¹ ed avviene in maniera immediata, cioè al termine della scansione si ha direttamente una *mesh*.

Al contrario, in una nuvola non strutturata, i punti formano una griglia spaziale irregolare (numero di punti differente per linea di scansione; distanza non uniforme tra i punti appartenenti ad una stessa linea; mancato allineamento tra punti appartenenti a linee di scansioni diverse)³². In questo secondo caso, la scansione genera una lista di punti 3D, che necessitano un ulteriore passaggio per essere trasformati in *mesh*. Difatti, se consideriamo una nuvola non strutturata 2.5D³³, la generazione della *mesh* usa – solitamente – algoritmi

³⁰ Anche l’*iter* di produzione del modello 3D varia se la nuvola di punti è strutturata o non strutturata. La sequenza *allineamento delle nuvole di punti-generazione della mesh*, da noi usata, è solitamente legata ad una nuvola di punti non strutturata, mentre le nuvole strutturate sono trasformate automaticamente in *mesh* alla fine della singola scansione, per cui si inverte l’ordine delle due fasi.

³¹ All’operatore è demandato soltanto il compito di fissare l’angolo tra le normali di due poligoni adiacenti, usato dall’algoritmo come valore-soglia per interrompere la *mesh*.

³² È questo il caso dei sistemi TOF.

³³ Il termine 2.5D indica che ad ogni coppia di coordinate (x, y) poste sul piano del sensore, corrisponde un solo valore di z .

basati sul criterio di Delaunay³⁴, che proiettano il *dataset* di punti sul piano, individuano quelli a distanza minima e i relativi collegamenti, al fine di creare un *network* di poligoni (solitamente triangoli). Successivamente i punti vengono riproiettati nello spazio, mantenendo soltanto i collegamenti che rispondono a determinate condizioni (l'entità dell'angolo tra poligoni adiacenti, la lunghezza massima dei lati del poligono, ...).

Le singole *mesh* allineate vengono fuse in un unico modello poligonale ed eliminate le zone di sovrapposizione tra le singole scansioni. La procedura di fusione è automatizzata, ma il suo risultato deve essere controllato (mantenimento delle caratteristiche iniziali, contenimento delle lacune e degli errori topologici) e, se necessario, ripetuta variando i parametri.

Solitamente il modello poligonale unito richiede una fase di *modifica e ottimizzazione* per migliorare la qualità della *mesh*. Tale passaggio, consiste in una serie di operazioni, condotte con modalità e procedure più o meno automatiche, le cui finalità possono essere riassunte come segue:

- individuazione e correzione degli errori topologici (normali invertite, bordi condivisi da più facce, intersezioni fittizie tra triangoli, ...);
- riempimento delle lacune;
- *smoothing* (o lisciatura) della superficie per ridurre il rumore (avendo l'accortezza di non intervenire sugli spigoli);
- decimazione della *mesh*, cioè riduzione del numero di poligoni, qualora si ritenesse che alcune aree del modello siano sovracampionate. L'entità della decimazione dipende, sia dal maggiore o minore dettaglio delle forme reali, che dall'uso che si intende fare del modello;
- suddivisione della *mesh*, cioè raffittimento selettivo di alcune zone, tramite l'inserimento di nuovi vertici e quindi di nuovi poligoni;
- *remeshing*, cioè regolarizzazione della *mesh* con conseguente redistribuzione dei poligoni Poiché si tratta di costruire una nuova superficie poligonale che approssima quella di partenza è consigliabile non intervenire con il *remeshing* nelle aree ricche di dettagli, pena la perdita delle informazioni

³⁴ Un reticolo di Delaunay nel piano è formato da triangoli che non si sovrappongono e i cerchi circoscritti ad ogni triangolo non devono contenere nessun altro nodo del reticolo.

Questo criterio non è l'unico modo per realizzare una triangolazione, ma è il più usato dai *software* poiché genera *mesh* regolari con variazioni contenute delle dimensioni tra i vari triangoli.

iniziali.

Nella fase di *texture mapping* vengono aggiunte al modello geometrico le informazioni legate all'apparenza visiva. In tal modo il modello poligonale descrive, oltre alle forme, anche l'aspetto della superficie (colore, finitura, ...) dell'oggetto che riproduce.

Spesso lo *scanner* non possiede una fotocamera con caratteristiche tali da poter garantire immagini ad alta risoluzione, allora è necessario acquisire a parte le foto e proiettarle sul modello poligonale, utilizzando punti omologhi tra loro.

Sempre nello spirito di costruire un modello fotorealistico, in alcuni casi è opportuno incrementare la somiglianza con l'oggetto fisico senza complicare ulteriormente il modello geometrico con l'aggiunta di un numero elevato di poligoni, ma soltanto "simulando" le finiture superficiali, gli elementi debolmente aggettanti o incavati e così via.

1.6 Cenni sulla fotogrammetria digitale

La fotogrammetria digitale consente di estrapolare i dati metrici tridimensionali e di descrivere l'apparenza delle superfici di un manufatto, a partire da almeno due riprese fotografiche che lo inquadrano da angolazioni differenti; dalle aree di sovrapposizione delle fotografie è possibile ottenere le informazioni spaziali, "trasformando" le informazioni bidimensionali in misure tridimensionali.

Il recente sviluppo dei *software* fotogrammetrici, l'automatizzazione delle procedure per l'orientamento delle immagini e la generazione di modelli poligonali, la disponibilità delle fotocamere digitali e dei *software* a prezzi relativamente contenuti, sono fattori che hanno portato alla diffusione della fotogrammetria digitale nel campo dei beni culturali.

In particolare, nel rilevamento architettonico la fotogrammetria digitale si configura come una tecnica in grado di integrare (e, in alcuni casi, sostituire) le tecniche attive. Volendola paragonare a queste ultime, possiamo dire che:

- al pari delle tecniche attive, consente di acquisire i dati in modo assolutamente non distruttivo, anzi non richiede nessun contatto con il misurato;
- dalle immagini è possibile estrapolare dati metrici accurati e *texture* ad alta risoluzione, dando luogo ad un modello tridimensionale fotorealistico; a differenza delle tecniche attive, per le quali è solitamente necessario un ulteriore passaggio dedicato al *texture mapping*, con la fotogrammetria tale codifica è immediata;
- la precisione e l'affidabilità dei dati rilevati sono paragonabili a quelli derivanti dai sensori attivi, ma i costi degli strumenti fotogrammetrici (macchine fotografiche, treppiedi, sistemi d'illuminazione, ...) sono decisamente inferiori;

Inoltre, sono caratteristiche precipue della fotogrammetria:

- la portabilità degli strumenti e la rapidità dei tempi d'acquisizione;
- la flessibilità nell'utilizzo da intendere, sia come adattabilità alle condizioni operative (cioè il campo di applicazione può variare dall'oggetto di piccole dimensioni al manufatto edilizio, alla struttura urbana, ...), che come qualità metrica raggiungibile;
- la possibilità di ricostruire manufatti distrutti, rimaneggiati, danneggiati, ..., da foto d'epoca, anche se, solitamente, non si ottengono risultati tali da poter analizzare in maniera metricamente accurata l'edificio, anche se consentono di avere situazioni percettivamente valide.

Per estrarre le informazioni metriche è necessario definire la relazione geometrica che lega univocamente i punti omologhi presenti sul manufatto (spazio oggetto) e sulle fotografie dello stesso (piano dell'immagine). Il modello matematico utilizzato per stabilire questa si esplicita attraverso le *equazioni di collinearità* (Fig. 1.21):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{A'} = x_H - \Delta x - c \frac{r_{11}(X_O - X_A) + r_{21}(Y_O - Y_A) + r_{31}(Z_O - Z_A)}{r_{13}(X_O - X_A) + r_{23}(Y_O - Y_A) + r_{33}(Z_O - Z_A)} \\ y_{A'} = y_H - \Delta y - c \frac{r_{12}(X_O - X_A) + r_{22}(Y_O - Y_A) + r_{32}(Z_O - Z_A)}{r_{13}(X_O - X_A) + r_{23}(Y_O - Y_A) + r_{33}(Z_O - Z_A)} \end{array} \right. \quad (1.20)$$

I termini che compaiono nelle due equazioni sono:

- $(x_{A'}, y_{A'})$ le coordinate del punto A' sul piano dell'immagine nel sistema di riferimento locale $\{x', y'\}$;
- (X_O, Y_O, Z_O) le coordinate del centro di proiezione O nel sistema di riferimento globale $\{X, Y, Z\}$;
- (X_A, Y_A, Z_A) le coordinate del punto A nel sistema di riferimento globale;
- (x_H, y_H) le coordinate del punto principale;
- R la matrice di rotazione del sistema di riferimento locale a quello globale;
- c la distanza principale (lunghezza focale effettiva);
- Δx e Δy i contributi dovuti alle distorsioni.

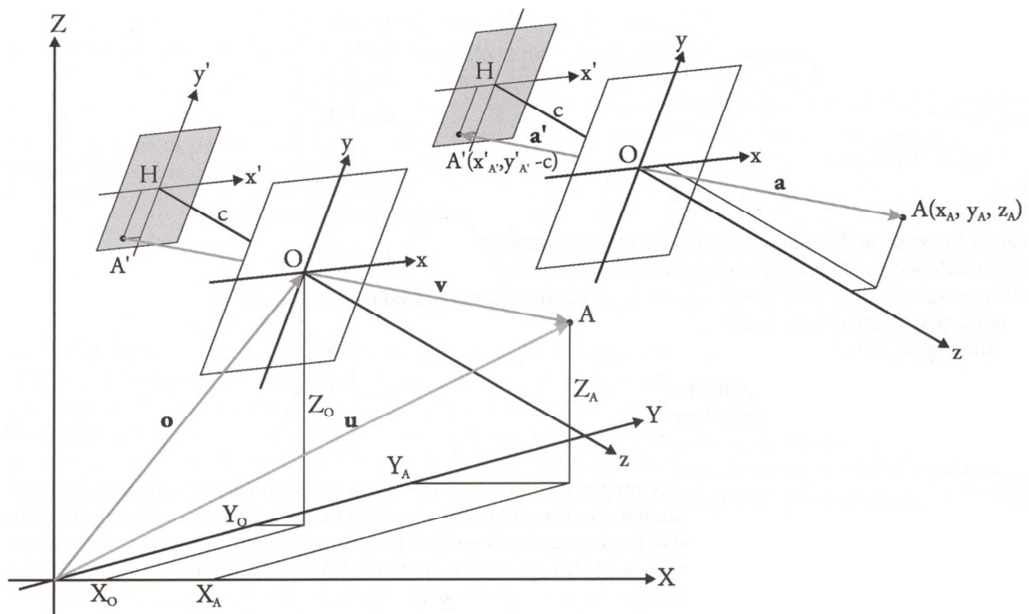


Fig. 1.21 – Proiezione prospettica con l'indicazione del riferimento globale e locale (G. GUIDI et al., 2010).

La fotocamera reale (per ragioni ottiche e meccaniche) si discosta da quella ideale, rendendo necessaria la stima dell'entità di questa variazione, attraverso la *calibrazione della fotocamera*.

Pertanto bisogna valutare la reale posizione dell'elemento fotosensibile rispetto all'asse ottico. In una configurazione ideale, il punto principale H si trova sulla normale al piano dell'immagine passante per il centro di proiezione

O , mentre nel caso di una fotocamera reale (considerando un sistema locale $\{x, y, z\}$ ancorato ad essa e con origine in O) le coordinate di H valgono $(x_H, y_H, -c)$. Oltretutto le immagini prodotte non sono solo il risultato della proiezione prospettica, ma risultano affette da distorsioni (radiale, tangenziale e affine) dovute alle lenti dell'obiettivo, delle quali si tiene conto attraverso i termini Δx e Δy .

I valori relativi alle coordinate del punto principale (x_H, y_H) , alla distanza principale c e ai parametri addizionali (AP), che servono per modellare gli errori sistematici dovuti alla distorsione (K_1, K_2, K_3 per la radiale; P_1, P_2 per la tangenziale e B_1, B_2 per la affine), sono determinati con la procedura di calibrazione e vengono detti *orientamento interno* della fotocamera. In tutto si tratta di calcolare 10 parametri, anche se per applicazioni relative ai beni culturali, generalmente, non vengono calcolati: B_1, B_2 (è fondamentale determinarli sono nel caso di applicazioni con precisioni elevatissime, tipo quelle industriali); K_2, K_3 (poiché il maggior contributo della distorsione radiale è rappresentato dal termine K_1 , gli altri due termini si calcolano solo per applicazioni industriali e lenti grandangolari).

Alla procedura di calibrazione, segue solitamente la *fase di orientamento delle immagini*, nella quale vengono calcolati i 6 parametri di *orientamento esterno* della fotocamera, cioè le coordinate (X_O, Y_O, Z_O) della fotocamera e gli angoli di rotazione intorno ai tre assi (ω, φ, κ).

Noti i parametri di orientamento interno e quelli di orientamento esterno, che andiamo a sostituire nella (1.20), dobbiamo calcolare le tre coordinate (X_A, Y_A, Z_A) del punto A , avendo a disposizione due sole equazioni. Il sistema ha infinite soluzioni, quindi, per definire univocamente le coordinate di A è necessario almeno un altro punto di vista, cioè almeno un'altra coppia di equazioni (Fig. 1.22).

Nell'*iter* di costruzione del modello tridimensionale, il passo successivo alla *calibrazione della fotocamera* ed all'*orientamento delle immagini*, consiste nell'*acquisizione dei punti* (manuale, automatica, o semiautomatica). L'acquisizione manuale o semiautomatica viene fatta nel caso in cui per definire la geometria di un oggetto bastano solo pochi punti, mentre è consigliabile usare procedure automatiche quando le superfici sono irregolari e ricche di dettagli.

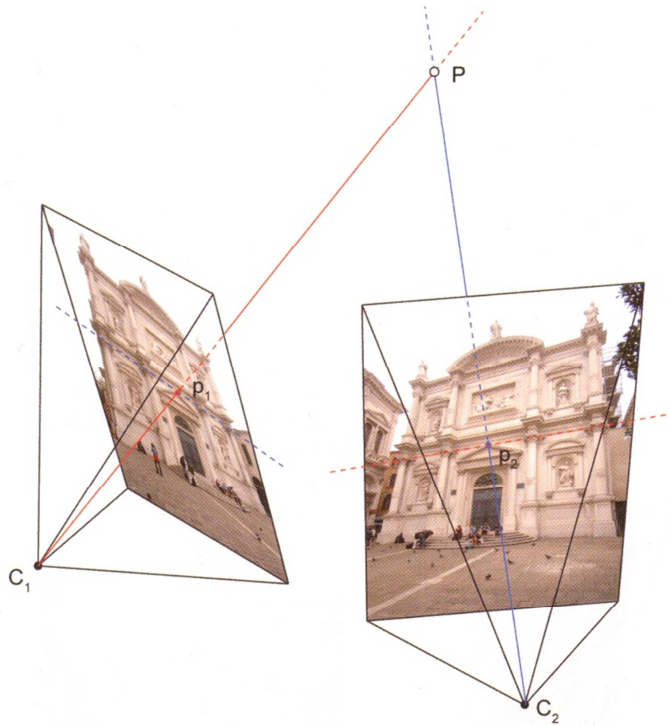


Fig. 1.22 – Definizione delle coordinate spaziali di un punto ripreso da due riprese fotografiche che lo inquadrano da angolazioni differenti (L. DE LUCA, 2011).

CAPITOLO 2

LE APPLICAZIONI PER I BENI CULTURALI

RICOGNIZIONE, RIFLESSIONI E DEDUZIONI

2.1 *La ricognizione. Premesse metodologiche e struttura delle schede*

Il campo d'interesse della presente "ricognizione" è circoscritto alle questioni indotte dalle nuove tecniche ottiche di misura 3D, nel rilevamento architettonico/urbano. In particolare, detta ricognizione si pone l'obiettivo di analizzare l'impatto di queste tecniche sul rilevamento e di riflettere sulla trasformazione delle procedure operative, delle strategie d'indagine e degli esiti figurativi, confrontandoli con le modalità del rilevamento "tradizionale".

Questa operazione serve, da un lato, per individuare gli attuali indirizzi e le linee di tendenza della ricerca; dall'altro, per "mettere ordine" e fare il punto delle esperienze, nazionali e internazionali, sintetizzando e facendo emergere i "concetti-chiave", che guidano il lavoro delle differenti unità di ricerca.

Per delineare lo stato dell'arte, abbiamo scelto una serie di casi studio, selezionati tra quelli sviluppati da diverse unità di ricerca nell'ambito del rilevamento dei beni culturali e successivamente, compilato delle apposite schede concepite *ad hoc*.

La scelta di non limitare la classificazione al solo campo del rilevamento architettonico, ma di includere quanto prodotto di interessante e innovativo nel più vasto settore dei beni culturali, è dettata dalla necessità di considerare un

ambito d'indagine più ampio, per comporre un quadro conoscitivo il più possibile completo ed oggettivo, sia nelle modalità (operative e metodologiche) di acquisizione, che di quelle di restituzione.

L'analisi categoriale, realizzata con la schedatura, opera secondo il principio di selezione (sia nella scelta delle esperienze, che nella cernita dei dati estrapolati da queste) e può orientare la conoscenza della realtà verso un sapere autoreferenziale, che può escludere quanto non contenuto nella classificazione, o peggio, diventare un giustificativo delle ipotesi poste e non un momento di verifica delle stesse.

La necessità di ridurre l'autoreferenzialità della conoscenza, costruita sulla base del processo di categorizzazione, insieme all'attributo di completezza che ogni atto conoscitivo deve possedere, sono ulteriori motivi da cui discende l'idea di allargare – quanto più possibile – il bacino d'indagine da cui trarre i dati.

Fernando Gil ci ricorda che la categorizzazione “è ben più di una teoria della costituzione del mondo: essa è una propedeutica critica alla conoscenza e una guida nella ricerca”³⁵. Anzi, la categorizzazione procede mediante operazioni di *scelta/individuazione* e *classificazione* dei dati, al fine di strutturare le esperienze dell'ambito indagato, quindi la conoscenza fenomenica e i percorsi per accedere ad essa.

La schedatura viene dunque concepita, non come un elenco fine a se stesso, ma come strumento “attivo” che dà luogo ad un contesto creativo, in grado di suscitare domande a cui far seguire delle risposte, anche quando si scelgono i casi studio, si selezionano e si ri-organizzano i dati nelle singole schede. Essa attiva quel potenziale di reazione che determina lo sviluppo della conoscenza, sia per la quantità e la qualità dei dati raccolti, sia per la loro nuova strutturazione, che rende possibile la comprensione delle connessioni logiche e delle interrelazioni, prima difficilmente “visibili”.

La schedatura, così intesa, diventa un mezzo operativo atto ad analizzare i singoli casi studio, disarticolando le loro componenti costitutive (metodo, procedure, risultati, prodotti grafici, ...) e ricomponendole per mezzo delle categorie in cui è suddivisa la scheda stessa.

³⁵ F. GIL, *Categorie/categorizzazione*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1977, vol. II, p. 816.

Il singolo caso studio, smembrato nelle sue componenti costitutive, è riunito nella scheda secondo categorie omogenee, per rendere possibile il confronto critico, valutando i metodi usati, i risultati e sviluppando riflessioni approfondite sugli elaborati grafici³⁶.

Un'attenta riflessione deve infatti riguardare le diverse modalità di restituzione adottate dai gruppi di ricerca e i "condizionamenti" legati alla logica di acquisizione delle tecniche *image-based* e *range-based*. Gli elaborati grafici di restituzione sono a loro volta riflesso di questi condizionamenti ed è interessante esaminarli per capire come questi possono indirizzare l'interpretazione, precorrendo e conducendo verso una determinata soluzione interpretativa, piuttosto che verso un'altra. Questo si può ottenere isolando il tipo di problemi che ricorrono nelle esperienze condotte con le tecniche di misura 3D, trovando legami tra esperienze simili di gruppi di ricerca differenti, o scoprendo le logiche d'azione delle singole esperienze di uno stesso gruppo.

Per classificare le diverse applicazioni delle tecniche ottiche di misura 3D per i beni culturali, abbiamo realizzato un'apposita scheda suddivisa in 12 sezioni (*unità di ricerca*³⁷, *anno*, *descrizione*, *obiettivo*, *keyword*, *strumenti e metodo*, *risoluzione*, *software*, *prodotti*, *pubblicazioni*, *pubblicazioni correlate e sitografia*).

Ogni sezione individua una categoria, cioè una "casella" che ha funzione attiva nel mettere ordine nella realtà, cioè nell'organizzare e raggruppare i dati raccolti con la ricerca bibliografica e sitografica

Le prime cinque sezioni (*unità di ricerca*, *anno*, *descrizione*, *obiettivo* e *keyword*) descrivono sinteticamente l'esperienza di ricerca, specificando il gruppo (o i gruppi) di studio e i limiti temporali³⁸; riassumono la natura e gli obiettivi da raggiungere. Le caratteristiche e le specificità dell'esperienza sono ricapitolate dalle *keyword*, che delineano i contenuti e gli argomenti trattati.

La sezione *strumenti e metodo* descrive in maniera analitica e approfondita gli strumenti, le tecniche e il metodo adoperato, ribadendo ed ampliando, in

³⁶ Tenendo presente che il "metodo" è un procedimento vantaggioso per raggiungere la conoscenza, sia dal punto di vista dei tempi, che dei risultati che possono ottenersi.

³⁷ Questa sezione assegna la "paternità" alla ricerca, poiché risulta interessante leggere l'esperienza anche alla luce della formazione disciplinare e culturale dei ricercatori.

³⁸ I limiti temporali riportati nel campo "anno" si riferiscono alla data d'inizio e di fine dell'esperienza. Nel caso in cui queste date non si conoscono, facciamo riferimento alla prima pubblicazione in cui è descritta l'esperienza, riportandone il riferimento bibliografico.

maniera estesa e completa, le informazioni delle altre sezioni.

Le tre sezioni successive (*risoluzione, software e prodotti*) riepilogano brevemente il passo di campionamento, l'accuratezza e la precisione raggiunta, le competenze specifiche (in termini di programmi informatici) e i prodotti della ricerca.

Le ultime tre sezioni della scheda (*pubblicazioni, pubblicazioni correlate e sitografia*) riportano le note bibliografiche e il repertorio di siti internet da cui sono estrapolati i dati registrati, attingendo a quanto divulgato della ricerca selezionata, in termini di articoli, libri, atti di convegni e siti web (Fig. 2.1).

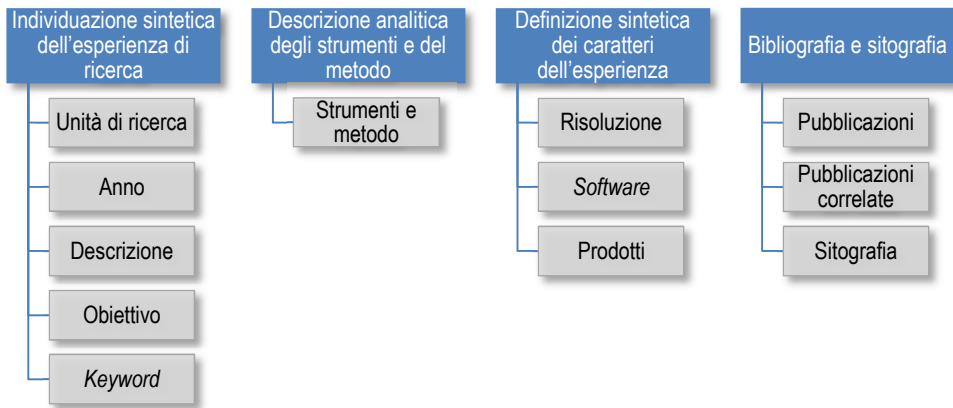


Fig. 2.1 – Schema riassuntivo delle sezioni adoperate nella schedatura. Per classificare le diverse applicazioni delle tecniche ottiche innovative di misura 3D per i beni culturali, abbiamo realizzato un'apposita scheda suddivisa in 12 sezioni.

Riassumendo, la scheda si articola in una parte iniziale per l'*individuazione sintetica dell'esperienza di ricerca* ed una finale per la *definizione sintetica dei caratteri dell'esperienza*; la parte centrale con la *descrizione analitica degli strumenti e del metodo* riporta la descrizione analitica del caso studio. La *bibliografia e sitografia* collegano il caso studio alla relativa produzione scientifica e offrono spunti per approfondimenti e studi particolareggiati.

La schedatura riguarda un totale di 14 *casì studio*, scelti come rappresentativi delle tendenze della ricerca nel campo dei beni culturali, poiché presentano caratteri innovativi e originali. Tali caratteri riguardano: le tecniche (di acquisizione, di allineamento, di modellazione, ...) usate, il metodo adoperato, le potenzialità d'indagine delle nuove tecniche, l'integrazione tra tecniche attive e passive, l'applicazione di particolari strategie d'analisi, i

risultati e gli esiti figurativi raggiunti, la sperimentazione di procedure diverse da quelle usuali, il trasferimento nel campo dei beni culturali di modalità proprie di altri settori e così via³⁹.

Abbiamo tralasciato esperienze simili, sviluppate contemporaneamente o in un periodo temporale successivo, poiché non presentano elementi di originalità.

L'ossatura della ricognizione è, dunque, costituita da esperienze condotte nel campo dell'architettura (5 schede), dell'archeologia (2 schede), della scultura (5 schede) e della pittura (2 schede). Di seguito è riportata la tabella con l'elenco dei casi studio analizzati (Tab. 2.1).

ARCHITETTURE	1	Hagia Sofia (Istanbul)
	2	la Sala delle Cariatidi (Palazzo Reale, Milano)
	3	la Cripta di Santa Cristina (Carpignano Salentino, Lecce)
	4	<i>digital Cathedral of Pisa</i>
	5	il complesso architettonico del Patirion (Rossano, Cosenza)
SITI ARCHEOLOGICI	6	l'Eretteo (Atene)
	7	il Foro Civile di Pompei (SNS, SAP, INDACO, FBK)
SCULTURE	8a,b	<i>the Digital Michelangelo Project & the Digital Forma Urbis Romae Project</i>
	9	<i>the Digital Minerva Project</i>
	10	la "Maddalena" di Donatello
	11	il "David" di Donatello
PITTURE	12	l'"Adorazione dei Magi" di Leonardo da Vinci
	13	la "Gioconda" di Leonardo da Vinci

Tab. 2.1 – Elenco dei 14 casi studio schedati.

A questo nucleo, si aggiungono altre 19 esperienze, che identifichiamo con il termine di *esempi di applicazione* (per distinguerli dai casi studio) e sono così distribuiti: 5 appartengono al campo dell'architettura, 4 a quello dell'archeologia, 9 a quello della scultura e 1 al campo della pittura.

La distinzione dai casi studio, si rende necessaria perché solo per questi ultimi abbiamo compilato delle schede approfondite, mentre per gli esempi di

³⁹ Per le schede dei 14 casi studio si rimanda al capitolo "Schede".

applicazione sono riportati una serie di dati, direttamente nelle griglie concettuali del paragrafo “*riflessioni e deduzioni*”.

La scelta di non compilare la scheda si rende necessaria, ogniqualvolta l’esperienza analizzata:

- non ha le caratteristiche di compiutezza proprie delle esperienze schedate, ma affronta soltanto un aspetto particolare di un problema e/o utilizzano la tecnica per sperimentare un algoritmo, una procedura, uno strumento;
- non presenta, rispetto ai casi studio schedati, caratteri di originalità e novità tali da rendere indispensabile la compilazione della scheda;
- non dà la possibilità di reperire i dati, in maniera sistematica, tanto da procedere alla compilazione della scheda, se non a scapito della sua completezza.





Pertanto, tutte le volte che ci siamo trovati di fronte ad una delle circostanze esposte, abbiamo scelto di inserire l’esperienza nella sola ricognizione, ma non di descriverla e classificarla con una scheda.

I dati riportati nelle griglie concettuali sono relativi all’*identificazione* dell’applicazione e ai suoi *limiti temporali*, alle *tecniche impiegate* e ai *risultati* intesi come prodotti sviluppati, avendo ben presente che la loro rilevazione, seppur senza compilare una scheda, contribuisce a definire lo stato attuale della ricerca e a tracciarne le linee di tendenza.

Tali dati rappresentano il bagaglio “minimo”, affinché l’applicazione possa assumere un ruolo attivo all’interno del contesto conoscitivo della ricognizione. In particolar modo, l’attenzione è centrata sulla catalogazione, sistematica e standardizzata, dei risultati della ricerca, trascendendo dalla descrizione analitica del metodo adoperato e dalle strategie operative, ma rilevando soltanto (e in modo sintetico) le tecniche e la loro eventuale integrazione.

In totale, gli esempi analizzati nel corso della ricognizione sono 33 (14 casi studio e 19 esempi di applicazione), mentre i limiti temporali si estendono dal 1998-’99 (*the Digital Michelangelo Project & The Digital Forma Urbis Romae Project* e la Pietà Bandini) fino al 2011, se consideriamo le ricerche attualmente in essere che utilizzano i dati di precedenti campagne d’acquisizione (la Grotta dei Cervi e l’Ebe di Canova).

La tabella 2.2 offre un quadro generale della ricognizione, in cui sono riportati i casi studio schedati e gli esempi di applicazione.

	ARCHITETTURE	1 Hagia Sofia (Istanbul)	CASI STUDIO
	2 la Sala delle Cariatidi (Palazzo Reale, Milano)		
	3 la Cripta di Santa Cristina (Carpignano Salentino, Lecce)		
	4 <i>digital Cathedral of Pisa</i>		
	5 il complesso architettonico del Patirion (Rossano, Cosenza)		
	6 Abbazia di Pomposa	ESEMPI DI APPLICAZIONE	
	7 Facciata del complesso di San Miniato al Monte		
	8 Badia di Sant'Agata (Catania)		
	9 Chiesa di San Pietro (Otranto) (progetto 3D Bizantino)		
	10 La camera delle Cariatidi di Palazzo Te (Mantova)		
	SITI ARCHEOLOGICI	11 l'Eretteo (Atene)	CASI STUDIO
	12 il Foro Civile di Pompei (SNS, SAP, INDACO, FBK)		
	13 l'Arco di Traiano (Benevento)	ESEMPI DI APPLICAZIONE	
	14 il Foro Civile di Pompei (DIAPReM, KFF)		
	15 Serra Cicora (Nardò) (progetto 3D Arceo)		
	16 Il complesso delle "Terme dell'Indirizzo" (Catania)		
	SCULTURE	17 <i>the Digital Michelangelo Project</i>	CASI STUDIO
	18 <i>the Digital Forma Urbis Romae Project</i>		
	19 <i>the Digital Minerva Project</i>		
	20 la "Maddalena" di Donatello		
	21 il "David" di Donatello		
	22 La Pietà Bandini	ESEMPI DI APPLICAZIONE	
	23 Stele e cippi (progetto 3D Arceo)		
	24 <i>Michelangelo's David restoration</i>		
	25 Metope di Selinunte (progetto 3D Arceo)		
	26 Il monumento funerario di Arrigo VII		
27 Zeus di Ugento (progetto 3D Arceo)			
28 Il modello ligneo della Basilica di San Pietro di A. da Sangallo il Giovane			
29 Il plastico di Roma in età Costantiniana			
30 L'"Ebe" di Canova			
	PITTURE	31 l'"Adorazione dei Magi" di Leonardo da Vinci	CASI STUDIO
	32 la "Gioconda" di Leonardo da Vinci		
	33 La Grotta dei Cervi (Porto Badisco) (progetto 3D Arceo)	ESEMPI DI APPLICAZIONE	

Tab. 2.2 – Quadro riassuntivo della ricognizione (casi studio schedati ed esempi di applicazione).

Il ultimo, ricordiamo che la selezione dei casi studio, degli esempi di applicazione e dei dati riportati nella scheda non è “indifferente” al risultato, ma risente della posizione culturale e disciplinare di chi la realizza. La scelta critica è un’operazione obbligata; non può essere un alibi per la mancanza di obiettività, poiché la selezione conferisce importanza alle esperienze e ai dati scelti e non si configura come atto “neutro”: nello sceglierli, nel preferirli ad altri, si riconosce loro uno specifico valore, sia probatorio che culturale.

Per evitare fraintendimenti, è doveroso specificare che non si vuol mettere in discussione la possibilità di raggiungere una conoscenza oggettiva dei fenomeni indagati, ma piuttosto prendere coscienza che il sapere trasmesso, tramite schedatura, ad una terza persona è già frutto di un’elaborazione e, che questo non viene assorbito in maniera passiva, ma è sempre ripensato in base alle personali modalità interpretative.

2.2 *Riflessioni e deduzioni. Attuali indirizzi e le linee di tendenza della ricerca*

La griglia concettuale come strumento per l’analisi

L’organizzazione della conoscenza imperniata sulle schede è, di norma, caratterizzata da una base sostanzialmente testuale, che funge da aggregatore per dati di diversa natura, sia visuali (immagini, foto disegni) che sonori (se si opera nel digitale).

Tale organizzazione presenta l’indubbio pregio di consentire un approfondimento “verticale” molto spinto delle singole esperienze, mentre lascia al fruitore della scheda il compito di creare un proprio percorso conoscitivo, componendo le esperienze in un modello mentale d’insieme. D’altro canto, la definizione di un quadro sintetico dello stato dell’arte della ricerca è sacrificato a favore di un’analisi serrata dell’esperienza indagata.

La frammentarietà dei dati, comune a tutti i sistemi di classificazione su base testuale, può (e deve) essere ricomposta mediante *griglie concettuali, grafici, diagrammi, ...*, cioè tramite dispositivi che operano su base grafica e/o

grafico-testuale. Infatti, se cambiano le regole combinatorie di aggregazione dei dati, questi ultimi possono acquisire, come già ricordato, nuovo valore e significato, favorendo la “scoperta” di connessioni logiche e interrelazioni, prima poco evidenti.

A tale scopo utilizziamo delle griglie concettuali e dei diagrammi, per riepilogare le schede in forma di sinossi e per consentire una rapida visione delle informazioni basilari, al fine di confrontarle mediante una rappresentazione in forma di tabella, rimarcando alcuni aspetti salienti delle ricerche selezionate. Contemporaneamente, la griglia permette, ad un eventuale fruitore, di trovarsi nella condizione più favorevole per cercare relazioni tra i dati e, quindi, per costruire un proprio percorso di conoscenza, oppure di rivedere criticamente quello prospettato⁴⁰.

Attraverso una determinata griglia concettuale si sviluppa una possibile lettura strategica della schedatura: operativamente si procede *selezionando* i dati da riportare e *visualizzandoli* su una base grafico/testuale, per focalizzare l’attenzione solo su particolari aspetti dell’esperienza. A valle di questo processo organizzativo, l’analisi della griglia permette di *discriminare* alcuni tra i dati selezionati con l’obiettivo di *canalizzare* l’interpretazione verso scenari conoscitivi plausibili (Fig. 2.2).

Sostanzialmente la griglia concettuale “agisce”, sia nella fase di costruzione che in quella della fruizione, secondo tre direttrici:

- stimola la memoria visiva, sfruttando la struttura tabellare che permette al fruitore di “cogliere” con un solo sguardo, l’intero insieme dei dati selezionati;
- spinge il fruitore a sviluppare un atteggiamento mentale attivo nella ricerca dei concetti-chiave e delle relative correlazioni;
- evidenzia i concetti-chiave e le connessioni esistenti tra di essi.

Lo scenario conoscitivo, costruito mediante il meccanismo sopra descritto e riportato nei due paragrafi seguenti, circonda una serie di evidenze, che divengono il punto di partenza per sviluppare le riflessioni sugli attuali indirizzi e trarre le conclusioni sulle linee di tendenza della ricerca, sia per gli aspetti tecnologici e di metodo, che per quelli legati alla rappresentazione.

⁴⁰ Le schede cioè possono dar luogo ad ulteriori griglie concettuali, oltre a quelle da noi proposte, variando i modi d’aggregazione dei dati.

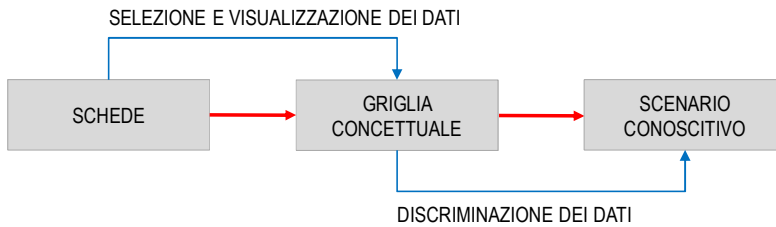


Fig. 2.2 – Work flow del processo di produzione di uno scenario conoscitivo.

Metodi, tecniche e procedure

La prima griglia presentata raccoglie ed organizza, in ordine cronologico crescente, le 33 esperienze catalogate (Tab. 2.3, p. 76). Ad ognuna di esse sono associati: l'anno o gli estremi temporali, la distinzione tra caso studio ed esempio di applicazione, la tipologia (architettura, archeologia, scultura o dipinto), la tecnica impiegata, descritta in maniera estesa e indicata in forma sintetica con una sigla (TA, tecnica *range-based*; TI, integrazione delle tecniche *range-based* e *image-based*; TA-ST, tecnica *range-based* e stazione totale integrata; TA-ST-F, tecnica *range-based*, stazione totale integrata e fotogrammetria da singolo elemento) e, infine, i prodotti della ricerca.

I prodotti della ricerca, cioè i risultati sviluppati nel corso dell'esperienza sono organizzati in 20 categorie (foto raddrizzata, nuvola rada di punti, nuvola densa di punti, ...) e per la loro completa enumerazione rimandiamo alla griglia stessa.

Tra questi abbiamo individuato due “super-categorie”, che raggruppano buona parte delle categorie. La prima comprende i modelli discreti/continui mentre, la seconda, i “prodotti di immagine”, cioè le immagini *raster* dedotte dai modelli.

A questi ultimi appartengono gli *snapshot* raddrizzati o meno ed eventualmente manipolati in ambiente CAD (quotatura, sovrapposizioni di profili, analisi geometrico-formali, ...); quindi, ci riferiamo sempre ad elaborati che agiscono sul piano, sia nel caso di proiezioni ortogonali, che di viste che simulano la terza dimensione (assonometriche e prospettiche).

A differenza dei prodotti di immagine, i modelli discreti, cioè le nuvole di punti rade o dense, sono effettivamente tridimensionali: in particolare, per nuvola “rada” intendiamo un insieme limitato di punti, ricavato con procedure manuali mediante tecniche *image-based*; al contrario, le coordinate tridimensionali dei milioni di punti che formano una nuvola “densa”, vengono estratte automaticamente, sia tramite tecniche *image-based* che *range-based*.

La nuvola di punti, rada o densa, è una codifica su base “discreta” della realtà, a differenza del modello geometrico continuo bidimensionale o tridimensionale (*mesh*, superfici NURBS, elaborati tradizionali, ...), costruito a partire da questa, che concretizza una codifica “continua” delle forme reali.

Una prima osservazione, dedotta dalla tabella, riguarda l’aumento, nel corso dei tredici anni esplorati, del numero di applicazioni nel campo dell’architettura, segno di un crescente interesse per le tecniche ottiche di misura 3D e, di conseguenza, di una loro progressiva influenza sulle modalità del rilevamento tradizionale. Il campo d’applicazione di queste tecniche nel settore dei beni culturali, prima prevalentemente legato al *reverse modeling* di sculture, di manufatti archeologici e – in maniera limitata – di dipinti, si è progressivamente esteso all’architettura e ai siti archeologici, variando l’ordine dei problemi e delle necessità⁴¹.

La scala di un’opera architettonica fa sì, che le esigenze di accuratezza e precisione diminuiscano notevolmente rispetto a quelle precipue dei reperti archeologici, dei dipinti, e delle sculture, mentre elevati *range* e velocità di scansione diventano ulteriori parametri da non trascurare (possibilità di ottimizzare la fase di acquisizione, di ridurre i tempi *in situ*, ...).

La griglia proposta registra come l’estensione alla scala architettonica e urbana, si ripercuote anche sulle tecniche e sugli strumenti usati, con un sempre crescente uso di *laser scanner* TOF ad impulsi e TOF *phase-shift*, caratterizzati da una “limitata” precisione – comunque adeguata allo scopo – ed elevati *range* e velocità di scansione, rispetto alle *range camera* a triangolazione e a proiezione di *pattern*, cioè a sistemi ad elevata precisione e limitato volume di misura⁴².

⁴¹ Un prototipo di *laser scanner* TOF (prodotto da Cyra Technologies) risale al 1998-’99 ed è stato usato contestualmente al *Digital Michelangelo Project* (Cfr. scheda).

⁴² Si passa da griglie di campionamento con risoluzioni submillimetriche, proprie dei sistemi a triangolazione e della fotogrammetria digitale *close-range*, a quelle subcentimetriche e

La possibilità di ottenere automaticamente nuvole dense di punti, mediante tecniche *image-based*, anche con precisioni paragonabili a quelle delle tecniche attive e con strumenti dai costi contenuti⁴³, ha recentemente aperto nuove possibilità nel campo della ricerca.

La tabella 2.4 riporta le esperienze relative ai soli manufatti architettonici e archeologici, caratterizzati da un grado di complessità elevato (anche se non omogenee per obiettivi della ricerca); in tal modo si restringe il campo d'indagine a 14 esperienze: 9 manufatti architettonici e 5 archeologici.

Il numero di esperienze in cui sono impiegati solo sistemi *range-based* è limitato soltanto a due, mentre tutte le altre sono caratterizzate dall'integrazione delle tecniche *range-based* e *image-based*, o dall'uso combinato di sensori attivi (*laser scanner* TOF ad impulsi e stazione totale integrata, *laser scanner* TOF ad impulsi e a modulazione di fase, oppure *laser scanner* TOF e *range camera* a triangolazione), o di entrambi⁴⁴.

Dall'esame delle cinque esperienze, relative all'integrazione delle tecniche, possono essere estrapolati due filoni, temporalmente consecutivi, che non devono essere necessariamente intesi come alternativi, ma piuttosto come la

centimetriche dei sistemi TOF, con una precisione sulla misura che varia dalla scala dei micron a quella dei centimetri.

Per la caratterizzazione degli strumenti (*range* e velocità d'acquisizione, precisione, ...), comunque variabili a seconda del modello, si rimanda alla categoria "Strumenti e metodo" di ogni scheda. In questa sede riportiamo, a titolo d'esempio, i valori di alcuni strumenti:

- *laser scanner* Leica HDS 3000 (sistema TOF ad impulsi), con *range* di misura che varia da 1 m a 100 m (portata efficace ottimale); velocità di scansione fino a 1.800 punti/s e precisione sulla distanza di 4 mm (da 1 a 50 m, su singolo punto);
- *laser scanner* Leica HDS 7000 (sistema *phase-shift*), con *range* di misura che varia da 0,3 m a 187 m; velocità di scansione fino a 1.016.727 punti/s e dimensione dello *spot laser* di 3,5 mm a 0,1 m;
- *range camera* a triangolazione MINOLTA-Vivid 900, con volume di misura che varia da 100x80x40 mm (*tele*) a 1.200x900x400 mm (*wide*); profondità di campo compresa tra 60 cm e 250 cm (*range* di misura ottimale: da 60 cm a 120 cm); risoluzione lungo z variabile da $\pm 0,19$ mm (*tele*) a $\pm 0,64$ mm (*wide*); precisione $x = \pm 0,22$ mm, $y = \pm 0,16$ mm, $z = \pm 0,10$ mm e velocità di scansione fino a 100.000 punti/s.

⁴³ In sostanza, una buona fotocamera digitale ed il *software* per la calibrazione e per l'estrazione automatica della nuvola di punti e della *texture*, dalle immagini. I costi, parametro da tenere sempre in considerazione, rendono particolarmente competitiva la fotogrammetria digitale *close-range*, tanto che questa può diventare il sostituto della *range camera* a triangolazione e a luce strutturata e affiancare i *laser scanner* TOF.

⁴⁴ Le due esperienze che utilizzano soltanto le tecniche attive sono: la *facciata del complesso di San Miniato al Monte* e il *complesso delle Terme dell'Indirizzo (Catania)*.

traccia del progressivo sviluppo delle tecniche *image-based* e del rafforzamento del loro ruolo nell'ambito del rilevamento architettonico⁴⁵.

N°	ANNO	ESPERIENZA (CASI STUDIO + ESEMPI DI APPLICAZIONE)	TECNICA IMPIEGATA
1	2003	l'Arco di Traiano (Benevento)	TA <i>laser scanner</i> TOF PW e <i>range camera</i> a triangolazione
2	2005	il complesso delle "Terme dell'Indirizzo" (Catania)	TA <i>laser scanner</i> TOF PW
3	2005	la facciata del complesso di San Miniato al Monte	TA <i>laser scanner</i> TOF PW
4	2000-'04	la Cripta di Santa Cristina (Carpignano Salentino)	TI <i>range camera</i> a triangolazione e tecniche IBM
5	2003-'04	la Sala delle Cariatidi (Palazzo Reale, Milano)	TI <i>range camera</i> a triangolazione e tecniche IBM
6	2005	la chiesa di San Pietro (Otranto)	TI <i>range camera</i> a triangolazione e tecniche IBM
7	2007-'08	l'Eretteo (Atene)	TI <i>laser scanner</i> TOF PW e CW, tecniche IBM
9	2007-'08	il Foro Civile di Pompei (SNS, SAP, INDACO, FBK)	TI <i>laser scanner</i> TOF PW e CW, tecniche IBM
9	2002	l'abbazia di Pomposa	TA-ST <i>laser scanner</i> TOF PW e stazione totale
10	2003	Hagia Sofia (Istanbul)	TA-ST <i>laser scanner</i> TOF PW e stazione totale
11	2003	il Foro Civile di Pompei (DIAPReM, KFF)	TA-ST <i>laser scanner</i> TOF PW e stazione totale
12	2005	la Badia di Sant'Agata (Catania)	TA-ST <i>laser scanner</i> TOF PW e stazione totale
13	2005-'07	<i>digital Cathedral of Pisa</i>	TA-ST <i>laser scanner</i> TOF PW e stazione totale
14	2006	il complesso architettonico del Patirion (Rossano)	TA-ST-F <i>laser scanner</i> TOF PW, stazione totale e fotoraddrizzamento

Tab. 2.4 – Tabella di sintesi anno/esperienza/tecnica impiegata, corrispondente alle 14 esperienze relative ai soli manufatti architettonici e archeologici.

Il primo filone, prevede l'applicazione di tecniche *image-based* per tutti quegli elementi, ambienti e volumi geometricamente "poco" complessi, che

⁴⁵ Le esperienze in questione sono individuate dalla sigla TI.

non hanno necessità di essere definiti con *mesh* formate da un elevato numero di triangoli⁴⁶, oppure che non presentano geometrie *freeform*; mentre, tutto ciò che presenta una geometria complessa, è campionato con una maggiore risoluzione, mediante tecniche *range-based* e, in particolare, con sensori a triangolazione.

Un esempio della prima modalità operativa è rappresentato dal rilevamento e dalla modellazione tridimensionale multi-risoluzione della *Cripta bizantina di Santa Cristina* in Carpignano Salentino (2000-‘04), finalizzati alla documentazione per il restauro, alla promozione e alla valorizzazione dell’opera. La fotogrammetria digitale è utilizzata per l’esterno (gli ingressi alla Cripta e lo spazio circostante), cioè per modellare volumi semplici e poco decorati, mediante un numero limitato di triangoli; mentre per l’interno, scavato nella roccia e caratterizzato da superfici affrescate, gli autori dello studio hanno scelto di realizzare un modello molto dettagliato, derivato da una serie di scansioni fatte con una *range camera* a triangolazione⁴⁷.

Un ulteriore esempio è rappresentato dalla modellazione tridimensionale multi-risoluzione della *Sala delle Cariatidi* nel Palazzo Reale di Milano (2003-‘04), al fine di simulare un cantiere virtuale di restauro. Le sculture (le cariatidi e le statue) e gli elementi a geometria complessa (i capitelli delle semicolonne, ...) – in sostanza gli elementi che presentano geometrie *freeform* – sono scanditi con una *range camera* a triangolazione, mentre il resto dell’architettura è il risultato dell’applicazione delle tecniche *image-based*⁴⁸. La fotogrammetria ha permesso di definire anche una serie di punti di controllo su cui assemblare, sia gli elementi acquisiti con i sensori attivi, che quelli ottenuti con la modellazione *feature-based*.

Il secondo filone comporta l’utilizzo delle tecniche *image-based* per la modellazione, sia di parti ed elementi geometricamente “poco” complessi, che di oggetti complessi. Pertanto, l’uso del *laser scanner* TOF a modulazione di fase, cioè di sensori attivi ad alta precisione, integrato con le tecniche *image-*

⁴⁶ In molti casi, l’acquisizione di una mole eccessiva di dati, rispetto alle informazioni che è possibile estrarre dall’oggetto scandito, non rappresenta un valore aggiunto, ma rende più “pesante” il modello in termini di megabyte e rallenta i processi di elaborazione nel passaggio dal modello discreto alla *mesh*.

⁴⁷ Per maggiori dettagli su questa esperienza e sulle successive, si rimanda alle relative schede.

⁴⁸ Il modello è stato ottenuto tramite tecniche di modellazione *feature-based* a partire da un’ortofoto, cioè mediante l’estrazione di profili 3D e la creazione delle superfici tra i profili.

based, può – potenzialmente – sostituire la *range camera* a triangolazione; questo filone è caratterizzato anche dall'uso combinato di sistemi attivi (*laser scanner* TOF ad impulsi e a modulazione di fase).

Anche per questo secondo filone riportiamo due esempi. Il primo riguarda la modellazione tridimensionale multi-risoluzione dell'*Eretteo* (2007-'08). In questo caso il gruppo di studio ha scelto l'uso combinato di due sensori *range-based*: un *laser scanner* TOF a modulazione di fase e uno ad impulsi. Il primo è caratterizzato da una velocità d'acquisizione elevata ed una maggior precisione rispetto a quello ad impulsi. Al contrario, quest'ultimo ha un *range* d'acquisizione elevato, ma la velocità e la precisione sono inferiori rispetto al sensore a modulazione di fase. Pertanto, la maggior parte del monumento è stato scandito con il *laser scanner* a modulazione di fase, tranne le zone fuori dal suo *range* di misura, per le quali si è usato lo *scanner* ad impulsi. Inoltre, si sono usate anche le tecniche *image-based* per: generare il DSM (*Digital Surface Model*) dell'intera area, colmare le lacune delle aree di difficile accesso, realizzare un modello semplificato dell'*Eretteo*, costruire dei modelli ad alta risoluzione geometrica di porzioni del tempio⁴⁹.

Il secondo esempio di questo filone, il *Foro Civile di Pompei* (SNS, SAP, INDACO, FBK), è emblematico perché riassume tutti gli aspetti finora elencati: l'integrazione delle tecniche *range-based* e *image-based*, l'uso combinato del *laser scanner* TOF ad impulsi e a modulazione di fase e la realizzazione di modelli multi-risoluzione, mappati con *texture* fotografica ad alta risoluzione. L'approccio multi-risoluzione varia dalla scala territoriale fino a quella di dettaglio delle strutture murarie, delle decorazioni e dei reperti. La campagna di scansione, condotta con due *laser scanner* TOF, ha prodotto una nuvola di punti dell'intero Foro, con una risoluzione geometrica compresa tra 5-20 mm⁵⁰. Questo modello discreto funge da "struttura" tridimensionale di riferimento all'interno della quale posizionare le scansioni di dettaglio. Le tecniche *image-based* sono servite per generare, sia il DSM con risoluzione geometrica di 25 cm, che i modelli semplificati con risoluzione geometrica

⁴⁹ Oltretutto, le tecniche *image-based* sono servite anche per valutare la "penetrazione" nel marmo del raggio laser del sistema a modulazione di fase.

⁵⁰ Gli *scanner* usati per la campagna d'acquisizione sono: un *laser scanner* TOF a modulazione di fase per il rilevamento di ambienti ed oggetti a piccola distanza e un *laser scanner* TOF ad impulsi per l'inquadramento globale del Foro.

variabile, in funzione del manufatto, che quelli con risoluzione geometrica di 0,5-10 mm.

I protocolli operativi, implementati con il rilevamento, tendono ad una semplificazione selettiva del modello poligonale iniziale, lasciando solo per alcune zone un'alta risoluzione geometrica: le superfici sostanzialmente piane sono ricostruite con pochi punti, mentre quelle ricche di dettagli, con una quantità elevata. Inoltre, la gestione del *texture mapping*, in maniera indipendente rispetto alla risoluzione geometrica, permette di variare la risoluzione dell'immagine in funzione del manufatto, massimizzando la quantità di informazioni associate al modello.

Infine, un interessante tema sviluppato e sperimentato nel corso di questa ricerca, riguarda la possibilità di intendere il modello tridimensionale, non solo come costruito osservabile da più punti di vista, ma come un insieme composto da più parti, a cui è possibile aggregare informazioni di natura differente (foto, disegni, testo, ...). In tal modo, il sistema conoscitivo, formato dai modelli tridimensionali collegati ai *database* archeologici della Soprintendenza, diventa un "3D GIS", in altre parole un'interfaccia per supportare gli archeologi nella documentazione, nella conservazione e nell'analisi.

Gli ultimi due gruppi, riportati nella tabella di sintesi, sono relativi a cinque casi: quattro (che coprono un arco temporale dal 2002 al 2007), in cui vi è l'uso combinato del *laser scanner* TOF ad impulsi e della stazione totale integrata ed uno caratterizzato, oltre che dall'uso combinato, anche dalla fotogrammetria da singoli elementi (fotoraddrizzamento)⁵¹.

Nei casi esaminati, la stazione totale ha una duplice funzione: guida l'allineamento delle nuvole di punti e integra i dati acquisiti dallo *scanner*, ogniqualvolta risulta più conveniente l'uso della stazione, rispetto allo *scanner* stesso.

L'allineamento dei singoli *scanworld* può essere facilitato utilizzando *target* (ad elevata riflettanza, o con una diffusività particolare, o di forma nota e distribuiti efficacemente nella scena), battuti con la stazione totale, da una poligonale d'appoggio aperta o chiusa. La condizione necessaria, per

⁵¹ L'esempio in questione riguarda il rilevamento del *complesso architettonico del Patrion* (2006), in cui la sovrapposizione della nuvola di punti e del fotopiano, ottenuto mediante la fotogrammetria da singoli elementi, è servita per ottenere i disegni vettoriali a scala di dettaglio, che descrivono l'aspetto materico dei paramenti murari.

un'effettiva semplificazione della procedura di registrazione, risiede nella possibilità che i *target* vengano riconosciuti direttamente dal *software* di registrazione⁵²; in tal modo, la procedura di registrazione diventa automatica. In alternativa, possono essere battuti con la stazione totale una serie di punti d'appoggio naturali, per la referenziazione delle singole riprese⁵³. Questo secondo approccio, non necessariamente alternativo al primo, si dimostra fondamentale nel caso in cui non sia possibile posizionare i *target* in maniera uniforme e non vi siano zone di sovrapposizione tra scansioni adiacenti⁵⁴.

Sulla scorta del quadro sinora delineato, le caratteristiche comuni alle esperienze analizzate, cioè i “concetti-chiave” che guidano il lavoro delle unità di ricerca, possono essere così riassunte⁵⁵:

- integrazione delle tecniche *range-based* e *image-based*;
- uso combinato di sensori *range-based*;
- modellazione poligonale multi-risoluzione con l'applicazione di *texture* fotografica ad alta risoluzione;
- documentazione per la conservazione e per il restauro;
- simulazione del restauro in ambienti virtuali;
- valorizzazione e fruizione di ambienti e modelli virtuali.
- modellazione semantica del manufatto;
- 3D GIS connesso a *database* esterni.

L'usuale complessità di un manufatto architettonico⁵⁶, molto spesso,

⁵² È il caso del *software* Cyclone, che si interfaccia con i *laser scanner* TOF prodotti dalla Leica Geosystems.

⁵³ Questa procedura si è usata nel caso studio schedato con il titolo di *Hagia Sofia (Istanbul)*.

⁵⁴ La possibilità di sfruttare le zone di sovrapposizione tra due scansioni adiacenti, eseguendo un primo allineamento mediante punti comuni alle due e un successivo allineamento globale di tutte le scansioni per minimizzare l'errore residuo, fa sì che questo approccio venga poco usato.

⁵⁵ Gli ultimi due punti sono relativi all'esperienza di ricerca del *Foro Civile di Pompei* (SNS, SAP, INDACO, FBK).

⁵⁶ La *complessità* riguarda:

- l'estensione del manufatto, la sua articolazione spaziale e volumetrica;
- la presenza e il numero di elementi geometricamente complessi (forme concave, fori passanti, ...);
- la compresenza di parti con differenti livelli di dettaglio, che spaziano dalle superfici sostanzialmente piane, a quelle geometricamente semplici, alle superfici affrescate, fino ad arrivare ai particolari architettonici, più o meno decorati e ad elementi propri della statuaria (statue, bassorilievi, altorilievi, ...);

comporta una spinta verso l'integrazione delle tecniche *range-based* e *image-based*, al fine di sfruttare al meglio le potenzialità dei due tipi di approccio (con l'evolversi dei *software* di fotogrammetria, detta integrazione sarà una costante). L'uso integrato delle tecniche *range-based* e *image-based*⁵⁷, nonché l'uso combinato di sensori TOF e *range-based* a triangolazione, consente:

- di scegliere il livello di dettaglio per ogni singolo manufatto, in relazione al suo contenuto informativo e alle caratteristiche dello strumento usato. In tal modo è possibile costruire modelli con differente risoluzione, per raggiungere il miglior compromesso tra la precisione dei modelli geometrici, l'oggetto scandito, la scala della rappresentazione e le possibilità operative;
- di acquisire dei dati ridondanti che servono, sia per verificare l'accuratezza delle diverse tecniche (controllo della qualità metrica dei dati acquisiti), che per integrare i dati provenienti da tecniche differenti⁵⁸;
- di controllare il livello di accuratezza (metrica e cromatica) raggiunto per i singoli modelli, sia nel corso della fase di registrazione⁵⁹, che nel processo

-
- le caratteristiche materiche e cromatiche della superficie del manufatto (colore, scabrosità e capacità riflettive della superficie, ...);

Inoltre, influiscono anche le condizioni in cui versa il manufatto, cioè l'eventuale stato di degrado e di dissesto; e ancora, trascendendo dall'opera, sono fattori che incidono sulla complessità: le contingenze del sito (accessibilità, orografia, ...) e dell'ambiente di lavoro (condizioni atmosferiche, luce ambientale, distanza di scansione, angolo d'incidenza del *laser*, ...).

La complessità, comunque non è mai determinabile in astratto, valutando soltanto le specificità dell'opera, ma è direttamente influenzata dagli obiettivi del rilevamento: il grado di accuratezza da raggiungere (nel modello poligonale, in quello geometrico, negli elaborati tradizionale, ...), la necessità di acquisire ulteriori attributi della superficie oltre a quelli geometrici (ad esempio il colore, la fitta trama e minuta trama delle lesioni di un quadro fessurativo), i tempi/costi per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, ...).

⁵⁷ È utile notare come l'integrazione può avvenire anche a livello strumentale, ad esempio, con sistemi che implementano fotogrammetria e *range camera* a proiezione di frange per aumentare l'accuratezza, oppure con l'applicazione di una macchina fotografica digitale ad alta risoluzione su uno *scanner* TOF per migliorare la qualità delle immagini.

⁵⁸ L'integrazione può essere intesa come "assemblaggio" di *range map* ottenute da *laser scanner* e fotogrammetria digitale, ma anche come applicazione di *texture* fotorealistiche ad alta risoluzione su un modello generato dallo *scanner*.

⁵⁹ Nella fase di registrazione, il controllo deve essere volto ad accertare l'entità degli eventuali errori presenti nell'unione di più *range map* e a verificare l'orientamento e il posizionamento dei modelli uniti (o delle singole *range map*) all'interno di una "griglia" globale (a tal

di modellazione.

La tendenza all'integrazione e all'uso combinato, che in molti casi assume un carattere di vera e propria necessità operativa⁶⁰ e di criterio guida nella strutturazione del metodo impiegato nel rilevamento, incentiva:

- lo sviluppo di protocolli per integrare il *laser scanner* TOF, la *range camera* a triangolazione, le tecniche *image-based*, e gli altri strumenti correntemente adoperati nel rilevamento (stazione totale, fotogrammetria da singoli elementi, ...);
- la sperimentazione delle potenzialità di tale integrazione, non soltanto in termini di accuratezza dei dati e delle modalità di acquisizione, ma anche di come vengono indirizzate e caratterizzate le restituzioni in funzione delle diverse logiche di acquisizione;
- l'esplorazione di nuove opportunità di fruizione, d'indagine e di restituzione, in accordo con le possibilità concretizzate dalla tecnica impiegata.

In figura 2.3 riportiamo un diagramma, che mette in relazione le dimensioni di un oggetto con il grado di complessità delle superfici “a forma libera” (*freeform*), per individuare la tecnica e lo strumento più appropriato.

L'analisi del diagramma mostra, ad esempio, come in corrispondenza di un basso livello di complessità delle *freeform* e per oggetti di piccole dimensioni, sia appropriato utilizzare la fotogrammetria digitale, che restituisce nuvole dense di punti; all'opposto, per manufatti di dimensioni maggiori e con un'elevata complessità delle *freeform*, conviene usare uno scanner TOF.

Al diagramma, seppur esemplificativo del *range* di utilizzabilità delle varie tecniche in funzione dei due parametri indicati, a nostro avviso, bisogna affiancare un ulteriore fattore imprescindibile: gli obiettivi del rilevamento in relazione, sia agli esiti che vogliono raggiungersi, che alla risoluzione spaziale, all'accuratezza e all'incertezza di tali esiti.

Inoltre, al netto degli obiettivi del rilevamento, il diagramma sottolinea che lo spettro di utilizzo di uno strumento o di una tecnica non riesce a coprire tutte le problematiche insite nell'usuale complessità di un'opera architettonica e,

proposito, si vedano le schede relative al *Foro civile di Pompei* e alla “*Maddalena*” di *Donatello*).

⁶⁰ La necessità deriva dalla complessità del manufatto e dagli obiettivi del rilevamento (ad esempio, nel caso di rappresentazioni a scale di dettaglio).

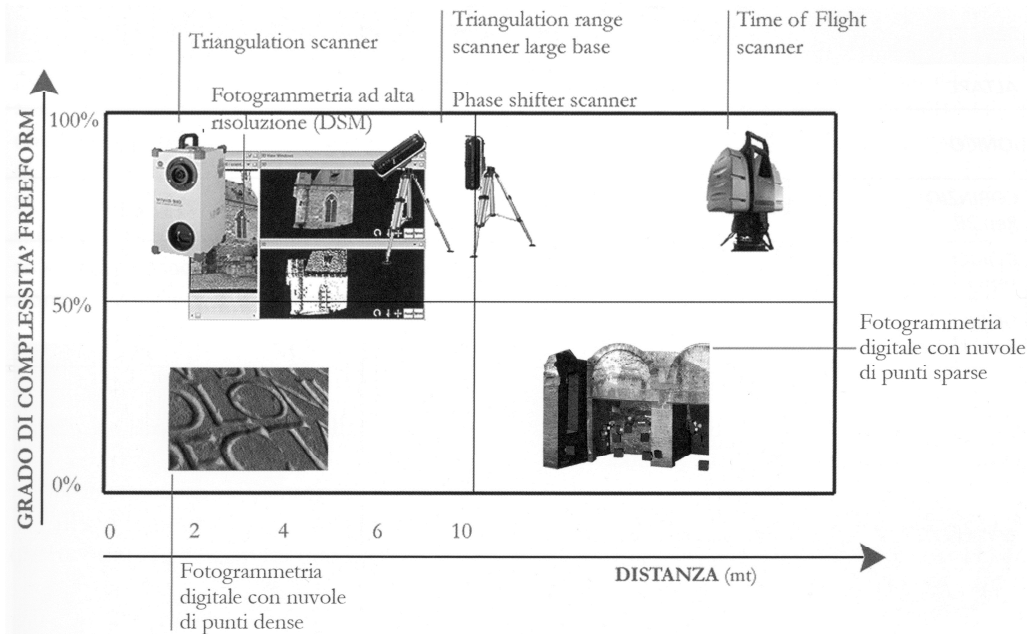


Fig. 2.3 – Diagramma che mette in relazione le dimensioni di un oggetto con il grado di complessità delle freeform, per individuare la tecnica e lo strumento più appropriato (B. BENEDETTI et al., 2010).

quindi, rimarca la necessità di un'attenta pianificazione della campagna d'acquisizione⁶¹, al fine di stabilire:

- le tecniche e gli strumenti per raggiungere gli obiettivi prefissati;
- le modalità d'integrazione.

Infine, possono essere forieri di sviluppi futuri interessanti, i “concetti-chiave” riportati nei due punti relativi alla semantizzazione del modello e alla realizzazione di sistemi informativi basati sul modello (3D GIS).

La modellazione “semantica” si traduce nella possibilità di considerare il modello digitale di un manufatto architettonico o archeologico, al pari di un sistema conoscitivo, strutturato come “una collezione di oggetti organizzati gerarchicamente, che vengono identificati attraverso un preciso vocabolario architettonico”⁶². La semantizzazione deve dar luogo alla scomposizione del manufatto nei suoi elementi costituenti e, quindi, alla segmentazione del

⁶¹ La pianificazione si basa su una duplice istanza: la complessità delle forme (e, in generale, dell'opera) e gli obiettivi del rilevamento.

⁶² B. BENEDETTI, M. GAJANI, F. REMONDINO (a cura di), *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa Edizioni della Normale, 2010, p. 237.

modello tridimensionale in altrettanti sub-modelli, ognuno dei quali rappresenta una parte chiaramente individuabile del manufatto stesso, definita dalla geometria, dalla tipologia e da regole compositive che lo legano agli altri elementi e al tutto.

I modelli semantizzati possono ancora essere arricchiti con ulteriori livelli informativi, connettendoli a *database* esterni. In tal modo si estende il concetto di 2D GIS a quello di 3D GIS, si congegnano cioè un sistema informativo centrato sul modello tridimensionale semantizzato, che diventa l'interfaccia per organizzare, gestire ed interrogare l'insieme delle informazioni memorizzate

La restituzione

Le tecniche ottiche di misura 3D incidono, non solo sul metodo e sulle procedure di acquisizione dei dati, ma su tutto l'*iter* tradizionale del rilevamento architettonico, modificando radicalmente i rapporti dialettici tra il rilevatore, il manufatto e la sua rappresentazione.

La sostanziale trasformazione dei rapporti è dovuta alla presenza, fin dalle prime fasi del processo di rilevamento, della nuvola di punti (ossia di un modello digitale tridimensionale)⁶³, che traspone il manufatto reale in un simulacro digitale e ne mostra le superfici e i volumi. Il modello, nella sua compiuta tridimensionalità diventa l'*incipit* del processo cognitivo promosso dal rilevamento, al contrario di quanto avviene tradizionalmente, dove è il rilevatore stesso a costruire un primo modello mentale, partendo da elaborati bidimensionali (piante, prospetti e sezioni) e da schizzi prospettici e assonometrici e solo in una fase successiva deriva un modello digitale tridimensionale.

Gli effetti di questa trasformazione sono molteplici e se, per un verso, il cambiamento dei rapporti dialettici si concretizza con la *trasformazione del rapporto tra rilevatore e opera da rilevare*, nonché con il *capovolgimento del processo di produzione dei disegni*, per l'altro, il modello tridimensionale, anche nella forma discreta di nuvola di punti, apre nuovi scenari conoscitivi e

⁶³ Il ragionamento non cambia se, invece del modello discreto (la nuvola di punti), ne consideriamo uno continuo (ad esempio, la *mesh* derivata dalla nuvola).

inedite occasioni, sia per la visualizzazione che per la restituzione⁶⁴.

Difatti, il modello tridimensionale, è un potente strumento di indagine dalle numerose potenzialità che, oltre a documentare, in maniera accurata, lo stato attuale (geometrie, aspetto cromatico, stato di dissesto e di degrado, ...), consente: la visualizzazione interattiva (esplorazione, manipolazione, presa delle misure, ...); l'analisi e la comunicazione (estrazione di elaborati bidimensionali, visite virtuali lungo percorsi liberi o prefissati, ...); il restauro virtuale, inteso come possibilità di simulare le ipotesi d'intervento direttamente sul modello; la riproduzione materica e così via.

In sostanza, il mezzo tecnico incentiva e rende possibili nuovi modi per affrontare le vecchie questioni e ne propone/impone di inedite. Il rilevatore tende ad attuare modalità d'indagine e soluzioni grafiche in accordo con la tecnica usata, inscrivendo le sue analisi nell'alveo delle possibilità suggerite dalla tecnica stessa e dalle sue potenzialità.

L'impatto della tecnica è estremamente rilevante e, a tal proposito, facciamo nostra la tesi di Gombrich che considera il mezzo un fattore condizionante della rappresentazione⁶⁵. Egli scrive: *“di fronte al motivo, se ha in mano la matita l'artista cercherà gli aspetti che si possono rendere con le linee, tenderà cioè, come si dice con espressione ellittica ma passabile, a vedere il motivo in termini lineari mentre, se impugna il pennello, tenderà a vederlo in termini di masse.”*⁶⁶

Considerando poi che le modalità grafiche, ma anche il modo d'analizzare, la maniera di intendere il rilevamento e di porsi nei confronti dell'edificio, sono tutti fattori che delineano lo “stile” di un rilevatore, cioè quel combinato disposto di sensibilità personale, formazione culturale e disciplinare, che tracciano precisi confini di appartenenza ad una “scuola”, o più in generale ad una tradizione e ad un'epoca. Pertanto, la rappresentazione deve vedersi come la risultante anche di questi fattori, oltre che delle possibilità/potenzialità del

⁶⁴ Per lo sviluppo dei temi citati, si rimanda al terzo capitolo (*“Il modello 3D e l'evoluzione dei rapporti cognitivi tradizionali”*).

⁶⁵ L'altro fattore cardine per Gombrich è il principio schema/correzione, su cui poggia l'attività della rappresentazione.

⁶⁶ E. H. GOMBRICH, *Arte e Illusione. Studio sulla psicologia della rappresentazione pittorica*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1965, p. 77. A supporto della sua tesi, Gombrich enumera una sequela di esempi: i disegni della *Dedham Vale* di Constable, il racconto ripreso dall'autobiografia di Ludwig Richter, ...

mezzo tecnico impiegato.

Partendo dal presupposto che le tecniche ottiche di misura 3D tendono a “vincolare” il risultato finale, sia in termini di restituzioni grafiche, che nel merito dei contenuti e dei problemi trattati, proponiamo un percorso di approfondimento che esplori come e in che misura le restituzioni grafiche vengano “condizionate” e quanto, le nuove opportunità di d’indagine, di documentazione, di fruizione e di restituzione, indirizzino la ricerca verso determinati obiettivi e risultati.

A tale scopo abbiamo predisposto una griglia concettuale simile, per organizzazione e dati riportati, a quella in tabella 2.3, tranne che per la suddivisione delle esperienze in due gruppi omogenei. Il primo raccoglie ed ordina le esperienze relative ai *manufatti archeologici e architettonici complessi* (i), mentre il secondo, quelle che attengono a *statue, dipinti, manufatti archeologici e architettonici non complessi* (ii) (Tab. 2.5, p. 77).

La prima analisi condotta sulla griglia mira a stabilire le quantità, per ogni tipologia di prodotto della ricerca, riferendole alle esperienze catalogate e in funzione dei due gruppi omogenei⁶⁷ (Fig. 2.4).

Questa lettura comparata dei gruppi mostra un andamento qualitativamente comparabile, con alcune evidenze:

- la quasi totalità delle esperienze del gruppo (i) dà luogo a *nuvole dense di punti*⁶⁸, successivamente trasformate (in tutto o in parte) in modelli poligonali (*mesh*). Tale gruppo comprende tutte quelle esperienze in cui le tecniche impiegate usualmente portano ad avere nuvole dense non strutturate, per le quali il passaggio dal discreto della nuvola, al continuo della *mesh* non è automatico, al contrario di quanto avviene per le nuvole strutturate;
- nella totalità delle esperienze del gruppo (ii) si è generata la *mesh*, poiché i sensori attivi adoperati (*range camera* a triangolazione e a luce strutturata)

⁶⁷ Nello studio delle esperienze, condotto sulla base dei diagrammi e delle tabelle di questo paragrafo, bisogna tener conto della non omogeneità degli obiettivi dei singoli casi studio e della differente distribuzione di questi ultimi negli anni considerati. Elementi che spingono a considerare i diagrammi in figura 2.4 e in figura 2.5, oltre che la tabella 2.6, non in termini strettamente quantitativi, ma come schemi rappresentativi di una linea di tendenza.

⁶⁸ Gli unici tre casi in cui non vi è una nuvola densa di punti riguardano esperienze di integrazione delle tecniche IBM (per la definizione di nuvole rade) e di *range camera* a triangolazione, che restituiscono – direttamente – la *mesh*.

PRODOTTI DELLA RICERCA

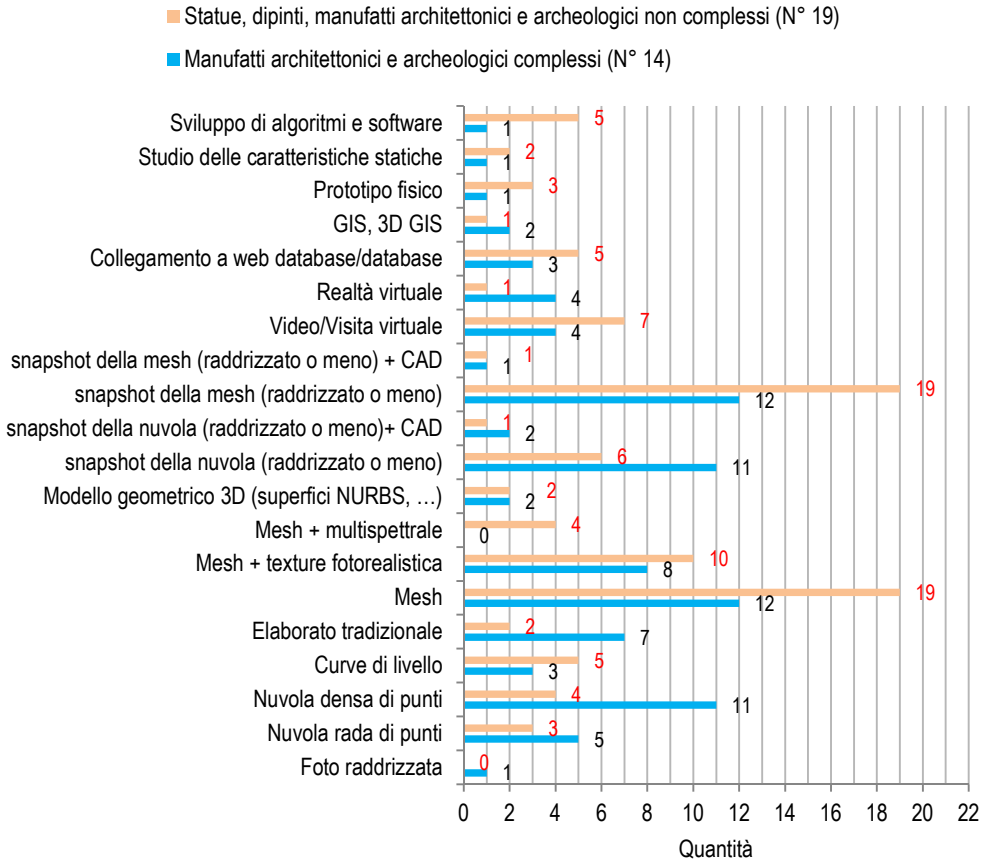


Fig. 2.4 – Diagramma con l'indicazione delle quantità per ognuna delle categorie in cui sono suddivisi i prodotti della ricerca.

danno luogo a nuvole strutturate, facilmente trasformabili in *mesh* dagli algoritmi di calcolo;

- in più della metà dei casi esaminati la *mesh* è mappata con *texture* fotografica. Situazione che si riscontra in entrambi i gruppi, anche se con percentuali lievemente differenti, mentre l'applicazione di *texture* nel campo del multispettrale a fini diagnostici, è relativa al solo gruppo (ii) e, in particolare, riguarda statue e dipinti;
- registriamo un significativo impiego, in entrambi i gruppi, di *snapshot* raddrizzati o meno ed eventualmente manipolati in ambiente CAD.

L'aumento di queste restituzioni, agevolmente deducibili dalla nuvola di punti o dal modello poligonale, avviene a scapito degli elaborati tradizionali, il cui processo di elaborazione è più lungo. Infatti, non tutte le esperienze relative al gruppo (i) danno luogo a questa tipologia, come invece accade regolarmente nel rilevamento tradizionale, dove rappresentano uno dei principali esiti figurativi;

- segnaliamo un maggiore sviluppo di algoritmi e *software* nelle esperienze del gruppo (ii), dovuto alla formazione disciplinare dei componenti dell'unità di ricerca.

Un'ulteriore indagine, limitata al gruppo (i), è condotta scindendo i prodotti della ricerca dalla singola esperienza e raggruppandoli in funzione della loro distribuzione temporale (Tab. 2.6 e Fig. 2.5).

PRODOTTO DELLA RICERCA <i>manufatti archeologici e architettonici complessi</i>	2002	2003	2003-'04	2000-'04	2005	2006	2005-'07	2007-'08
Foto raddrizzata								
Nuvola rada di punti								
Nuvola densa di punti								
Curve di livello								
Elaborato tradizionale								
Mesh								
Mesh + texture fotorealistica								
Mesh + multispettrale								
Modello geometrico 3D (superfici NURBS, ...)								
Snapshot della nuvola (raddrizzato o meno)								
Snapshot della nuvola (raddrizzato o meno)+ CAD								
Snapshot della mesh (raddrizzato o meno)								
Snapshot della mesh (raddrizzato o meno) + CAD								
Video/Visita virtuale								
Realtà virtuale								
Collegamento a web database/database								
GIS, 3D GIS								
Prototipo fisico								
Studio delle caratteristiche statiche								
Sviluppo di algoritmi e software								

Tab. 2.6 – Tabella che riporta i prodotti della ricerca del gruppo (i) in funzione della loro distribuzione temporale.

Le informazioni, che emergono da questa lettura, rimarcano quanto già

evidenziato nella tabella precedente riguardo, sia ad una spiccata tendenza verso la modellazione poligonale (*mesh*), sia alla successiva applicazione di *texture* fotografiche ad alta risoluzione, che al massiccio utilizzo di *snapshot*. Oltretutto, dalla sequenza temporale, si evince chiaramente la tendenza/necessità, fin dalla prima esperienza censita, di passare dal discreto (la nuvola di punti) al continuo (la *mesh*); un discorso analogo si può fare anche per gli *snapshot*, ma in questo caso, piuttosto che di necessità, si tratta dell'opportunità di ottenere dei "surrogati" degli elaborati tradizionali con tempi di elaborazione nettamente inferiori.

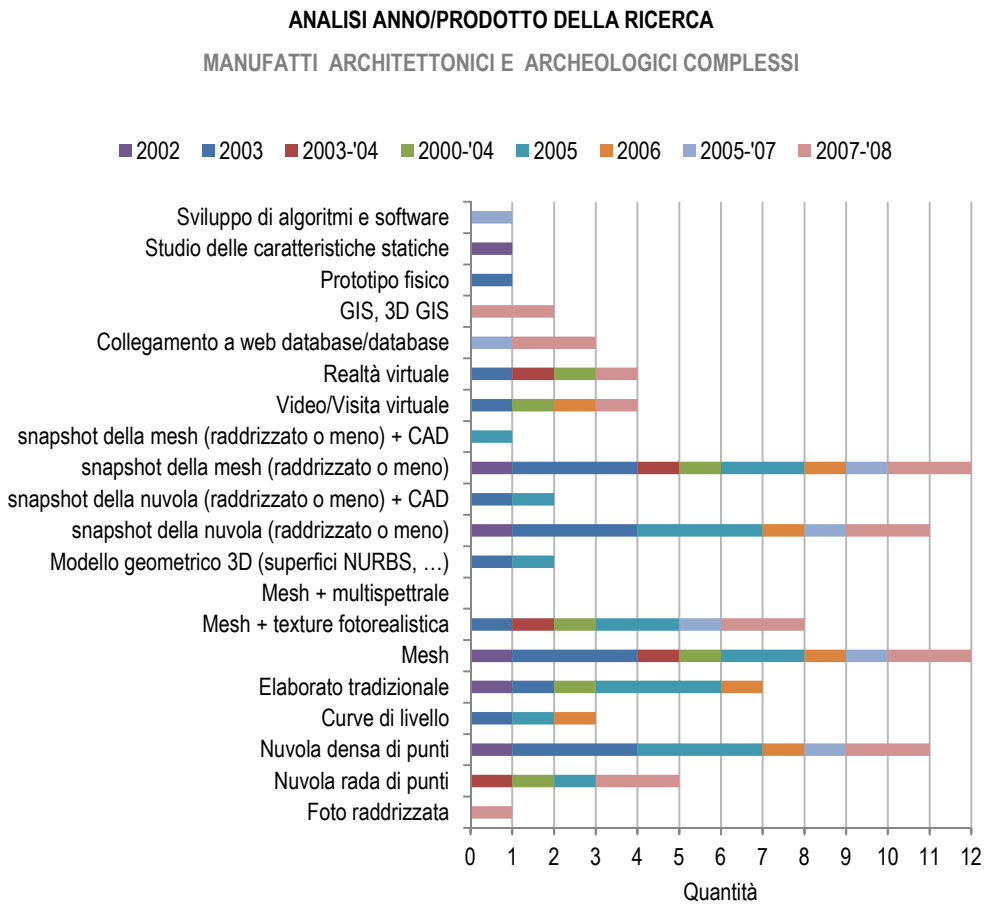


Fig. 2.5 – Diagramma con l'indicazione delle quantità per ognuna delle categorie in cui sono suddivisi i prodotti della ricerca

Inoltre, la realizzazione di video/visite virtuali e di realtà virtuale è un'ulteriore possibilità, anche se non sfruttata appieno. Diventano comuni, negli anni temporalmente più vicini, l'integrazione con *web database/database*, la strutturazione di GIS e 3D GIS, mentre risulta ancora poco praticata la prototipazione tramite stampanti 3D.

La sintesi interpretativa proposta con le tabelle e con i diagrammi, nonché lo studio analitico dei prodotti delle singole ricerche schedate, determinano un quadro complessivo, in cui le nuove tecniche ottiche di misura 3D influiscono sull'ordine dei problemi e delle necessità, proprie del rilevamento tradizionale.

Il mezzo tecnico, che non ha istanze percettive, ma solo esigenze fisico-tecnologiche, determina un processo di acquisizione legato alle sole potenzialità della tecnica, "imponendo" le sue problematiche (elevata accuratezza, ricerca della verosimiglianza, ...) e riversandole nelle restituzioni correntemente prodotte.

In tutte le operazioni del rilevamento tradizionale, infatti, predomina la "qualità" del risultato, mentre con le tecniche di misura 3D sono la precisione, il riscontro metrico e la possibilità d'accuratezza ad avere un ruolo predominante.

Il rilevamento tradizionale stesso propone una restituzione efficace in senso compositivo, con un'attenzione elevata alle logiche geometrico-formali, quindi alla ricerca degli elementi essenziali che ne definiscono le qualità formali e allo studio di una eventuale legge compositiva, che regola i rapporti tra le parti e il tutto, fino ad indagare i legami tra i singoli elementi che formano le varie componenti di un'opera.

Le tecniche *range-based* e *image based* muovono dalla quantità e dalla qualità metrica dei dati acquisiti e, quasi inevitabilmente, spingono verso una maggiore attenzione alla precisione della forma geometrica, ovvero alla definizione "esatta" delle geometrie reali, ad una restituzione verosimile – mediante immagini che riproducono le forme, i materiali e i colori delle superfici –, alla realizzazione di visite virtuali, alla ricostruzione virtuale di ambienti e così via, più che puntare ad una rappresentazione valida in senso analitico (compositivo, percettivo, ...).

In sostanza, con le nuove tecnologie è forte la spinta a raggiungere situazioni di verosimiglianza, sino al limite di un modello digitale che appaia

più “vero” dell’oggetto fisico stesso, confinando in secondo piano le operazioni di ricerca formale (moduli geometrici ripetuti, allineamenti e proporzionamenti, logiche compositive, ...).

La verosimiglianza, operativamente, si traduce nella ricerca di una spiccata aderenza delle forme rappresentate con quelle del manufatto reale e nell’applicazione di foto ad alta definizione (o *texture*), tanto da superare i limiti fisici della percezione visiva, trascurando, o relegando a livelli di importanza secondaria, il fattore di scala⁶⁹.

Il parametro della verosimiglianza sembra essere diventato imprescindibile: si tende alla costruzione di un modello figurativo “identico” al reale, anche quando risulta superfluo, come accade, ad esempio, nell’analisi formale. La capacità di calcolo dei computer e lo sviluppo dei *software* favorisce il carattere “estensivo” della rappresentazione “informatica”, cioè la proliferazione degli elaborati, a differenza di quanto avveniva nel disegno tradizionale, caratterizzato dall’economia dei segni, dei disegni e dal riuso delle immagini. Infatti, dopo aver ottenuto la *mesh* (passaggio spesso oneroso per tempi e risorse *hardware* e *software* necessari in presenza di nuvole di punti non strutturate di grande dimensione), si possono facilmente desumere da questa, un numero potenzialmente infinito di viste senza, molte volte, tener conto della loro significatività.

D’altro canto, l’utilizzo di foto ad alta definizione, mappate sulla nuvola di punti al fine di ottenere una descrizione verosimile delle superfici, insieme alla possibilità di evidenziare il degrado superficiale dei materiali attraverso la riflettenza, apre nuove opportunità di indagini, ai fini della lettura degli elevati,

⁶⁹ La *scala di rappresentazione grafica*, lungi dall’essere solo un rapporto matematico convenientemente scelto in base alla “grandezza” con cui si vuole raffigurare il manufatto o una sua parte, esprime, prima di tutto, il legame con il concetto di *focalizzazione per gradi della percezione*. La facciata di un edificio ci appare da lontano nelle sue linee essenziali: distinguiamo la griglia formale e le eventuali variazioni in essa, in altre parole l’assetto d’insieme, ma restano indefiniti i particolari decorativi. Soltanto avvicinandoci riusciamo a cogliere le varie parti dell’apparato decorativo fino ad arrivare a percepire i singoli ornamenti. Per un interessante esempio di recupero del valore della scala si rimanda a B. BENEDETTI, M. GAIANI, F. REMONDINO (a cura di), op. cit., Pisa Edizioni della Normale, 2010. Un recupero inteso in funzione di parametri percettivi, della potenza di calcolo necessaria e della larghezza di banda per una eventuale consultazione tramite *internet* e concretizzato mediante modelli con differenti livelli di dettaglio per la visualizzazione e l’utilizzo in ambienti di realtà virtuale).

della mappatura di fenomeni di degrado e di dissesto⁷⁰.

Dal punto di vista delle restituzioni, si ha la tendenza a produrre elaborati tradizionali (piante, prospetti, sezioni, ...) – tipologia di disegni che si presenta onerosa dal punto di vista dei tempi di elaborazione – solo nel caso in cui vengono espressamente richiesti, ad esempio, nel caso di restauro del manufatto. Nella maggior parte dei casi, invece, si punta ad ottenere immagini raddrizzate o meno – a seconda degli scopi –, desunte dalla nuvola di punti o dalla *mesh*, integrandole con elaborazioni vettoriali, da usare come surrogati dei disegni tradizionali e sui quali condurre l'analisi.

Altri prodotti della ricerca, oramai consueti e da inscrivere nell'alveo della ricerca della verosimiglianza, sono le visite virtuali, o i video desunti da modelli sia discreti che continui. Si è dimostrata interessante l'applicazione della realtà virtuale in campo architettonico, sfruttando la modellazione tridimensionale per simulare un cantiere virtuale di restauro, tramite visualizzazione semi-immersiva in *real-time*⁷¹.

In ultimo, possibili sviluppi futuri sono da ricercarsi nella realizzazione di 3D GIS, cioè di sistemi informativi, che hanno come base il modello tridimensionale del manufatto, a cui sono collegati *database* esterni, al fine di creare strutture integrate grafico-testuali per la documentazione, la promozione di nuovi tipi di indagini e di ulteriori possibilità di analisi⁷².

⁷⁰ Il dissesto statico, solitamente visto come presenza qualitativa di lesioni (per analizzare le lesioni si utilizzavano – e si utilizzano tuttora – sensori capaci di integrare le informazioni ottenute dal rilievo tradizionale) può essere valutato anche nei suoi aspetti metrici, ad esempio, mediante rappresentazioni a curve di livello, o con sistemi grafici che utilizzano gamme cromatiche per definire lo scostamento da una superficie ideale.

⁷¹ Cfr. il caso studio relativo alla *Sala delle Cariatidi* (Palazzo Reale, Milano).

⁷² Cfr. il caso studio relativo al *Foro Civile di Pompei* (SNS, SAP, INDACO, FBK).



Tab. 2.5 – Griglia concettuale che ordina le 33 esperienze catalogate in due gruppi omogenei: uno relativo ai manufatti archeologici e architettonici complessi (i), l'altro, a statue, dipinti, manufatti archeologici e architettonici non complessi.

CAPITOLO **3**IL MODELLO 3D E L'EVOLUZIONE DEI RAPPORTI COGNITIVI
TRADIZIONALI3.1 *Rilevamento tradizionale e nuvola di punti*

Il rilevamento architettonico è un processo grafico-analitico di interpretazione, finalizzato alla costruzione di un sistema di conoscenze per la comprensione e la rappresentazione grafica di un manufatto o di un ambiente urbano. Tradizionalmente tale processo, organizzato secondo uno schema ciclico “autocorrettivo”, inizia con una prima *lettura*, che anticipa e indirizza le successive fasi di *discretizzazione/razionalizzazione* delle forme e *presa delle misure*; quindi, si concretizza con la *restituzione grafica* dei significati architettonici dell’opera e la *verifica* (morfologica, metrica, percettiva, ...) della “qualità” dei risultati⁷³.

Nel costruire questo sistema di conoscenze, la “posizione” del rilevatore (rispetto alle informazioni messe a disposizione dal manufatto) è affatto ininfluyente, essendo le sue osservazioni subordinate, sia al binomio schemi posseduti/matrice culturale, all’esperienza, alle competenze e alla sensibilità personali, sia al metodo, alle procedure e alle tecnologie utilizzate. Oltretutto, neppure la posizione di chi recepisce le informazioni prodotte è “neutra”,

⁷³ A margine di quanto detto, è doveroso annotare che un rilievo, per quanto accurato, non arriva mai ad esaurire il complesso di significati che un’architettura trattiene.

perché a sua volta applica dei “filtri” e non acquisisce passivamente il sapere trasmesso.

Nel rilevamento tradizionale, proprio per le procedure e le tecnologie comunemente impiegate, non si può prescindere dalla prima delle fasi d’analisi, cioè dalla *lettura/interpretazione* del manufatto. Anzi, essa riveste un ruolo cardine nella comprensione dell’opera ed è uno dei pilastri su cui si fonda la qualità dell’azione di rilevamento.

In questa fase, il rilevatore analizza criticamente il manufatto, ne *razionalizza* le forme al fine di *renderle discrete* per poterle *rappresentare* con un numero sufficientemente adeguato (e limitato) di punti. In tal modo opera una duplice scelta: seleziona i punti da misurare e sceglie il tipo di “codifica”, per trasformare il continuo dell’opera reale in un altro continuo fatto di linee, curve, piani e superfici sottese ai punti selezionati. Sulla base di questa sua personale trascrizione della realtà, programma le successive operazioni di misura e pianifica le strategie operative atte a ridurre la soggettività, sia nelle misurazioni, sia nella successiva trascrizione grafica, consapevole che questa può essere limitata, ma non annullata completamente. Egli “costruisce” il suo modello mentale del manufatto, in base ai propri processi cognitivi connessi alla percezione visiva e ai dati oggettivi che raccoglie analizzando l’opera.

I disegni di rilievo, traduzione in immagini dei processi percettivi e dei riferimenti oggettivi, sono un’interpretazione dell’oggetto e non la “semplice” registrazione della realtà, sono un’ipotesi di lettura e rappresentazione della stessa alla luce, sia delle finalità dell’indagine condotta, che della formazione del rilevatore (schemi, matrice culturale, esperienza, competenze specifiche, ...).

Pertanto, in ogni disegno prodotto vi è la compresenza di soggettività e oggettività. La soggettività, propria dell’interpretazione, è legata ai processi percettivi, oltre che alla discrezionalità nella scelta del metodo e delle procedure operative; mentre l’oggettività è una caratteristica dei dati, intesi come il risultato di un procedimento (fisico-tecnologico e/o concettuale) di astrazione, messo in atto per descrivere un particolare aspetto, o un tratto distintivo del manufatto indagato.

Nel rilevamento tradizionale, questo binomio è inscindibile. Il rilevatore fissa sulla carta la sua prima interazione con il manufatto mediante dispositivi

grafici comunemente detti eidotipi; cioè con schizzi realizzati dal vero, a mano libera, che restituiscono le forme e le reali proporzioni dell'architettura in esame e, con i quali, egli opera una prima analisi interpretativa, riportandone le qualità formali, metriche e così via. È su queste prime trascrizioni del manufatto che viene predisposto il progetto di presa delle misure, ossia quanto serve per la definizione delle sue forme e delle proprietà metriche.

Inoltre, gli eidotipi registrano il percorso cognitivo del rilevatore, ne descrivono gli scarti interpretativi e palesano, sin da questa fase del rilevamento, gli elaborati grafici finali bidimensionali. La loro realizzazione prefigura il risultato: i disegni fatti e le misure prese sono finalizzati alla produzione di uno specifico elaborato con un determinato rapporto di scala. La scelta di “cosa” misurare e “cosa” tralasciare, insieme al “come” misurarlo, condiziona in maniera decisiva il rilevamento sino ad anticipare il risultato finale.

Oltretutto, la prefigurazione è correlata a quei fattori, di cui si è già fatto cenno (schemi posseduti, condizionamenti determinati dalla matrice culturale del rilevatore, ...) e che si palesano anche attraverso le modalità con cui vengono razionalizzate le forme del manufatto, cioè con la scelta delle primitive geometriche adoperate per rappresentare gli elementi dell'architettura indagata.

In virtù di quanto appena detto, anche se gli eidotipi entrassero a far parte della documentazione finale del rilevamento, al pari degli elaborati bidimensionali cui danno origine, non potrebbero essere, per la loro natura interpretativa, un contraltare oggettivo, da affiancare alle “trascrizioni in pulito”, cioè ai disegni finali di rilievo⁷⁴.

L'introduzione di tecniche ottiche innovative di misura 3D⁷⁵ incide sull'*iter*

⁷⁴ Fermo restando che l'eidotipo è parte integrante delle operazioni di rilevamento e come tale deve essere conservato, disponibile ad essere analizzato ogniqualvolta se ne presenti la necessità. In assenza del manufatto rilevato, i soli elaborati finali rappresentano un prodotto “chiuso” dal punto di vista delle possibilità di valutazione delle qualità morfologiche e metriche, pertanto quanto registrano non ha più possibilità di riscontro; al contrario, la presenza degli eidotipi, può offrire occasioni di approfondimento e di verifica.

⁷⁵ L'espressione usata si riferisce, sia alle tecniche attive *range-based* che a quelle passive di *image-based modeling* (IBM), che permettono di estrarre automaticamente le nuvole di punti. In questo scritto, il termine tecnica è inteso nella sua accezione più estesa, conglobando in esso un ampio spettro di significati che comprende, sia gli strumenti tecnici che il metodo e le

tradizionale del rilevamento, modificando i rapporti dialettici tra il rilevatore, il manufatto e la sua rappresentazione. Ma, se queste nuove tecniche sono la causa del mutamento nei rapporti, il fattore determinante di detta evoluzione è da ricercare nell'introduzione della *nuvola di punti*, ossia di un modello digitale tridimensionale, nel processo di conoscenza oggi possibile con il rilevamento.

Le conseguenze di questi cambiamenti sono molteplici e, tra queste, possono essere annoverate le nuove opportunità di fruizione, d'indagine e di restituzione che il modello rende possibili. Ma se focalizziamo la nostra attenzione sull'evoluzione dei rapporti indotta dal modello numerico, individuiamo due conseguenze sostanziali: da una parte, la *trasformazione del rapporto tra rilevatore e opera da rilevare*, dall'altra, il *capovolgimento del processo di produzione dei disegni*.

Prima di entrare nel merito di entrambe le questioni è opportuno approfondire la "natura" della nuvola di punti e delinearne le caratteristiche; in sostanza, comprendere questo nuovo "soggetto", che affianca il manufatto e la sua rappresentazione, per coglierne le potenzialità e la carica rivoluzionaria.

La nuvola di punti è un modello numerico, che "codifica" la continuità delle forme reali attraverso degli enti discreti (i punti); rappresenta una *replica digitale* del manufatto, che lo affianca e – al limite – può tendere a sostituirlo.

Allo stesso tempo, la nuvola di punti, oltre a replicare la realtà in maniera più o meno fedele, è anche un prodotto per molti aspetti "nuovo" e dall'accresciuto contenuto informativo, che può essere elaborato in ambiti spaziali e temporali distinti da persone diverse e con *software*, modalità operative e obiettivi differenti, ottenendo risultati variabili, sia a livello di definizione metrica, che di rappresentazione, ma sempre verificabili (Fig. 3.1).

Essa si configura come un *archivio digitale* di dati di natura diversa⁷⁶, la cui

procedure. A tal proposito, Galimberti scrive: "con il termine "tecnica" intendiamo sia l'universo dei mezzi (le tecnologie) che nel loro insieme compongono l'apparato tecnico, sia la razionalità che presiede al loro impiego in termini di funzionalità ed efficienza. Con questi caratteri la tecnica è nata non come espressione dello "spirito" umano, ma come "rimedio" alla sua insufficienza biologica." U. GALIMBERTI, *Psiche e tecne. L'uomo nell'età della tecnica*, Milano Feltrinelli, 2007, p. 34.

⁷⁶ Ad ogni punto acquisito e registrato nel *database*, sono associate: la terna di coordinate cartesiane che ne definisce la posizione spaziale, le tre coordinate colorimetriche (RGB) e il valore della riflettanza, un parametro legato alla quantità di luce che viene riflessa dalla superficie su cui incide, definito come il rapporto tra l'intensità della radiazione riflessa e

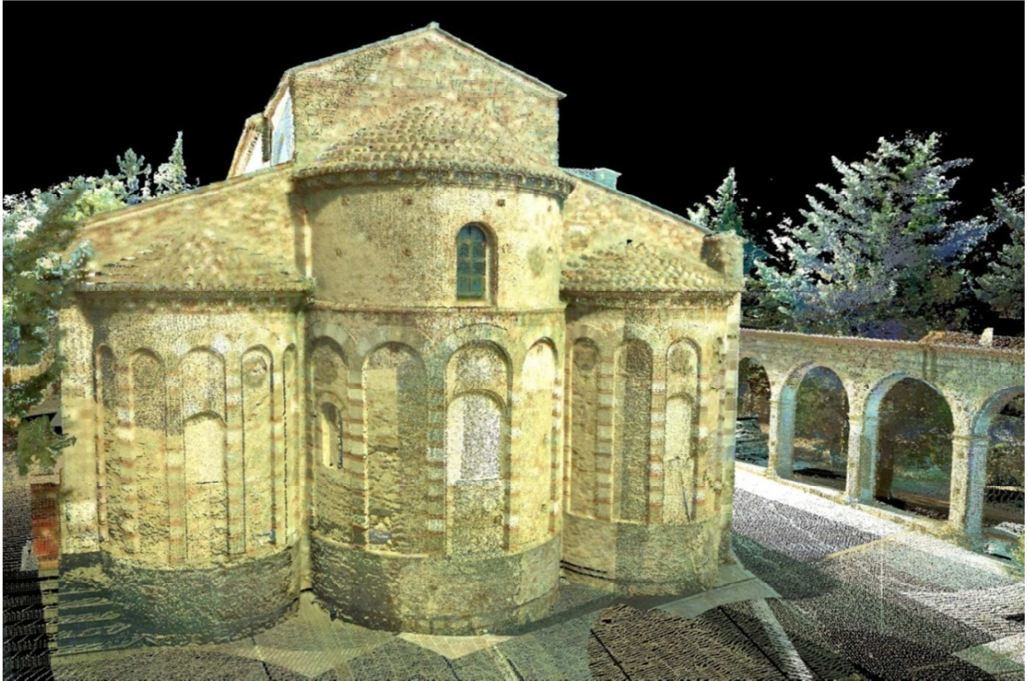


Fig. 3.1 – *Complesso architettonico del Patirion (Rossano); vista prospettica a quadro inclinato delle absidi e di parte del chiostro dedotta dalla nuvola di punti*. La nuvola di punti è un modello numerico, che “codifica” la continuità delle forme reali attraverso degli enti discreti (i punti); rappresenta una *replica digitale* del manufatto, che lo affianca e – al limite – può tendere a sostituirlo. Allo stesso tempo, la nuvola di punti, oltre a replicare la realtà in maniera più o meno fedele, è anche un prodotto per molti aspetti “nuovo” e dall’accresciuto contenuto informativo, che può essere elaborato in ambiti spaziali e temporali distinti da persone diverse e con *software*, modalità operative e obiettivi differenti, ottenendo risultati variabili, sia a livello di definizione metrica, che di rappresentazione, ma sempre verificabili.

oggettività è garantita dal connubio tra le potenzialità della tecnica e le modalità di acquisizione fissate dal rilevatore⁷⁷. Questo connubio consente di

quella incidente.

⁷⁷ Le caratteristiche di acquisizione della nuvola (l’elevato numero di punti e la notevole velocità di acquisizione degli stessi, la loro spiccata accuratezza e la quantità di informazioni associata ad ognuno di essi: posizione, colore e riflettanza) insieme alla pianificazione della campagna di scansione (scelta del tipo di strumenti, modalità per l’integrazione di tecniche *range-based* e *image-based*, progetto delle riprese e del passo teorico di campionamento di ognuna di esse, valutazione dell’errore massimo nell’allineamento delle *range map*) determinano il percorso costitutivo del modello digitale e, allo stesso tempo, lo accreditano come struttura dati oggettiva.

Pertanto, l’oggettività non è un attributo della tecnologia che si trasferisce – *d’emblée* – al modello digitale, ma è l’esito dell’unione tra le potenzialità del mezzo tecnico e il metodo usato. Solamente l’unione di queste due polarità consente di porre le basi per la costruzione di

stabilire un *isomorfismo* tra la nuvola e il manufatto, che rende ammissibile la sostituzione della realtà con il modello numerico, centrando e costruendo su quest'ultimo il processo d'analisi.

L'*oggettività* è l'attributo essenziale della nuvola di punti, prerogativa necessaria per realizzare l'isomorfismo di cui sopra e che la qualifica come l'entità digitale da cui è possibile ricavare informazioni, estrapolandole dai dati oggettivi di cui è portatrice.

Nella costruzione del modello numerico è fondamentale definire il *campo di validità* dello stesso, cioè stabilirne il limite di significatività. In base a questo è possibile determinare, non solo lo "spazio" delle questioni a cui esso può dare risposte, ma anche fino a che profondità possono spingersi le interrogazioni conservando la scientificità⁷⁸. Si tratta di fissare il *range* di "utilizzabilità" del modello in funzione delle modalità di costruzione e quantificarlo mediante parametri relativi alle caratteristiche d'acquisizione e alla campagna di scansione⁷⁹.

Da quanto detto, ne discende che un qualsivoglia modello, sia numerico che geometrico, dotato di *oggettività* e di cui sia specificato il *campo di validità* è, a tutti gli effetti, un contenitore di informazioni che può aspirare a sostituire l'oggetto concreto. Il passaggio successivo si ha nel momento in cui emerge una precisa volontà di sfruttare questa potenziale risorsa informativa. Solo

un sistema oggettivo di conoscenze e, nel contempo, palesa il rapporto duale tra lo strumento e l'uomo, tra i principi fisici della macchina e i processi cognitivi dell'uomo, tra le esigenze della tecnica e gli intenti del rilevatore.

⁷⁸ Intendendo la quantità, qualità e tipologia di dati che è "scientificamente lecito" estrarre da un particolare modello. Ad esempio, i limiti nella descrizione e nella misurazione delle forme reali sono legati alle caratteristiche del sensore 3D, al passo di campionamento, al valore dell'incertezza di misura, all'errore di allineamento delle *range map*, e via dicendo. E ancora, a fini della lettura degli elevati, della mappatura del degrado e della valutazione del quadro fessurativo (anche nei suoi aspetti metrici) è necessario mappare le superfici del modello con foto ad alta risoluzione.

⁷⁹ Oltretutto se pensiamo ad un *approccio scalabile* alla modellazione, possiamo utilizzare la stessa base di dati (modello *master*) da cui derivare modelli ottimizzati in funzione di differenti finalità (gestione del patrimonio, studi scientifici, fruizione turistica, ...), manipolando la quantità di informazioni di cui il modello è portatore. Ad esempio, è opportuno utilizzare un modello "semplificato", qualora questo sia finalizzato alla visualizzazione sul *web*, da utenti non interessati ad un elevato dettaglio delle geometrie.

allora il modello diventa effettivamente un *documento digitale*⁸⁰, cioè una fonte di informazioni.

3.2 *La trasformazione del rapporto manufatto-rilevatore e il capovolgimento del processo di produzione dei disegni*

Nell'economia del rilevamento tradizionale, la prima interpretazione del manufatto costituisce il fondamento della misurazione e il cardine della restituzione grafica; al contrario, nel contesto metodologico delle tecniche ottiche di misura 3D, una fase preventiva di analisi e comprensione del manufatto, influenza in misura limitata la “costruzione” della nuvola di punti. Difatti, essa riveste un ruolo “secondario” ai fini della campagna d'acquisizione, essendo poco, o nulla, vincolante nella pianificazione della presa delle misure⁸¹.

All'interpretazione del manufatto da parte del rilevatore, si sostituisce l'acquisizione di milioni di punti, registrati in maniera acritica senza distinguere quali, fra gli elementi dell'architettura in esame, ne definiscono le qualità essenziali⁸².

⁸⁰ L'aggettivo *digitale* sottolinea la natura virtuale del modello (rimarcando la dualità manufatto/modello digitale), anche se è sufficiente il solo termine *documento* a circoscrivere le possibili sfaccettature di una fonte di informazioni, poiché nella sua accezione più estesa lo si riferisce a qualsivoglia entità fisica, o digitale, in cui siano registrate delle informazioni. Per approfondire l'argomento si rimanda a: J. LE GOFF, *Documento/monumento*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1978, vol. V; G. VIGINI, *Glossario di biblioteconomia e scienza dell'informazione*, Milano Editrice Bibliografica, 1985; S. VITALI, *Passato digitale. Le fonti dello storico nell'era del computer*, Milano Bruno Mondadori, 2004.

⁸¹ Nel *nouveau cours* prospettato dalla nuvola di punti “sembra” quasi attenuarsi il ruolo dell'eidotipo, inteso come dispositivo grafico preposto alla trascrizione della morfologia dell'oggetto e “strumento” essenziale per la razionalizzazione e l'organizzazione della fase di misurazione.

⁸² Anche se non bisogna dimenticare che il rilevatore controlla costantemente la fase di acquisizione dei dati. Egli pianifica questa fase secondo criteri di efficacia dei risultati ottenuti e rapidità nella procedura impiegata, scegliendo cosa riprendere e cosa tralasciare, stabilendo il numero e la posizione degli *scanworld*, decidendo la “maglia” teorica delle singole riprese in funzione della parte da acquisire e così via. Ma la stessa variazione nel passo di scansione, se

La nuvola “duplica” per punti la continuità delle forme reali, *codificando* gli elementi continui del manufatto in funzione delle esigenze della tecnica; mentre, il rilevatore *ricostruisce* tale continuità per mezzo di altri enti continui, basandosi sui propri processi cognitivi.

Pertanto, essa si propone come soggetto intermedio tra l’opera e la sua rappresentazione introducendo un livello di oggettività elevato, impensabile nel rilevamento tradizionale e che rende possibile la separazione dell’*acquisizione* dei dati, dalla loro *lettura/interpretazione, discretizzazione/razionalizzazione e misura*⁸³.

In figura 3.2 è esemplificato il confronto tra il rapporto manufatto-rilevatore nel rilevamento tradizionale e l’evoluzione dovuta all’introduzione della nuvola di punti. Il grafico mostra la convergenza verso la rappresentazione dei due modi di “fare rilievo”⁸⁴, ma è un tipo di rappresentazione dalle differenti modalità e potenzialità grafico-analitiche, dal momento che i condizionamenti e le “possibilità” della tecnica si riflettono non solo sull’acquisizione, ma anche sui risultati e sui dispositivi grafici adottati.

da un lato, agisce nel verso di ottimizzare le procedure di ripresa, diminuendo il tempo di scansione e creando *database* di facile gestione; dall’altro, rappresenta una prima basilare razionalizzazione dell’opera.

⁸³ Resta comunque il fatto, che l’oggettività non si propaga automaticamente dal modello numerico alla rappresentazione finale dell’opera, poiché è il rilevatore a dedurre il modello geometrico ed a proporre una sua lettura avendo la nuvola di punti come principale *input* da cui trarre informazioni.

⁸⁴ Rimarcando, in tal modo, la necessità di controllare la tendenza all’autoreferenzialità della tecnica, per evitare che riesca ad “imporre” le proprie problematiche (elevata precisione e accuratezza, estrema verosimiglianza, ...) a scapito degli obiettivi prefissati, proponendosi come *fine* ultimo e non come *mezzo*. Scrive Galimberti: “*Nell’universo delle azioni possibili, la tecnica inaugura quell’agire in conformità a uno scopo, in cui è riconoscibile il tratto tipico della razionalità, il cui procedere non è regolato dall’arbitrio, ma dal calcolo che valuta l’idoneità dei mezzi in ordine a fini prefissati. In questo quadro, in cui ci si propone dei fini da raggiungere con opportuni mezzi, si visualizza l’uomo come soggetto dell’azione e la tecnica come strumento a sua disposizione.*

Accade però che l’ordine degli strumenti condiziona la scelta dei fini, rigidamente vincolata dalla quantità e dalla qualità dei mezzi a disposizione, con la conseguenza che il perseguimento dei mezzi, senza di cui nessun fine è raggiungibile, diventa il primo fine, per il conseguimento del quale tutti gli altri fini vengono subordinati e, se necessario, sacrificati.” U. GALIMBERTI, op. cit., Milano Feltrinelli, 2007, p. 251.

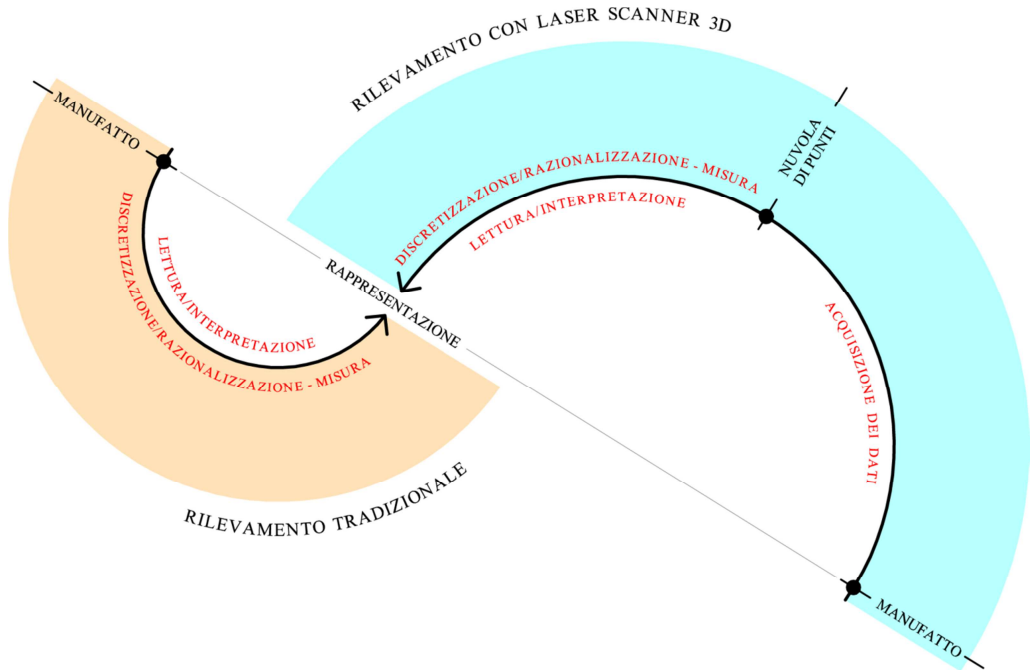


Fig. 3.2 – Schematizzazione del confronto tra il rapporto manufatto-rilevatore nel rilevamento tradizionale e l'evoluzione dovuta all'introduzione della nuvola di punti. Nel rilevamento tradizionale, è il manufatto ad essere posto al centro dell'attività di esplorazione: la lettura critica, la definizione delle forme e la presa delle misure vengono fatte direttamente su di esso, avvalendosi, sia di mezzi concettuali e di procedure (restituzioni grafiche, metodi di presa delle misure, ...) che di indagini strumentali, mantenendo sempre costante il rapporto tra rilevatore e manufatto in tutte le fasi. Al contrario, le tecniche di misura 3D danno luogo ad un'interazione diretta con il manufatto solo durante la campagna d'acquisizione, fintanto che non ne viene costruito il modello digitale (la nuvola di punti).

Nel rilevamento tradizionale, è il manufatto ad essere posto al centro dell'attività di esplorazione: la lettura critica, la definizione delle forme e la presa delle misure vengono fatte direttamente su di esso, avvalendosi, sia di mezzi concettuali e procedure (restituzioni grafiche, metodi di presa delle misure, ...), che di indagini strumentali, mantenendo sempre costante il rapporto tra rilevatore e manufatto in tutte le fasi.

Al contrario, le tecniche di misura 3D danno luogo ad un'interazione diretta con il manufatto solo durante la campagna d'acquisizione, fintanto che non ne viene costruito il modello digitale (la nuvola di punti); successivamente, nelle altre fasi del rilevamento, "tendono" a realizzare un rapporto sostanzialmente "indiretto": si studia, si definiscono le forme e si effettuano le operazioni di misura agendo sulla nuvola di punti, con le funzioni e i comandi messi a

disposizione dal *software* usato e non più con strumenti fisici.

In sostanza, la nuvola di punti, per la sua natura di replica digitale del manufatto (ma con un potenziale informativo ampliato), porta ad operare principalmente su di essa⁸⁵, alterando le tradizionali reazioni cognitive, legate all'interazione tra il fenomeno architettonico e il rilevatore. Paradossalmente, la nuvola rende più complesso il *feedback* percettivo⁸⁶, dovuto alla fisicità dell'opera, utile per variare o correggere opportunamente le restituzioni grafiche e, in generale, le conclusioni raggiunte.

Questa potenziale tendenza all'autonomia del modello numerico rispetto al manufatto è la conseguenza delle caratteristiche di autosufficienza della tecnica adoperata e può indurre a trascurare la realtà, ovvero a confondere virtualità e realtà.

A nostro avviso, per supplire al rapporto diretto, assente per la maggior parte del rilevamento, nonché per controllare e limitare la tendenza all'autonomia, è conveniente abbinare alla nuvola di punti, dispositivi grafici *ad hoc* e foto ad alta risoluzione, con l'obiettivo di fissare il ricordo, operare una prima analisi formale e verificare i risultati ottenuti.

A tale scopo, si possono predisporre due tipologie differenti di dispositivi: un primo gruppo con il compito di *controllo* "a priori" di tale autonomia; ed un secondo gruppo, di *verifica* "a posteriori" dei risultati prodotti dal "dialogo creativo"⁸⁷ tra rilevatore, nuvola di punti e manufatto, mediato dai dispositivi di controllo "a priori" (Fig. 3.3).

I dispositivi di *controllo* "a priori", lungi dall'essere solo una raccolta di casi e situazioni descrittive, sono punti di partenza per la successiva manipolazione della nuvola di punti, che affiancano le informazioni dedotte direttamente da essa, al fine di ottenere conferme alle osservazioni fatte, o spunti per nuove indagini⁸⁸.

⁸⁵ Oppure, nel peggiore dei casi, soltanto su di essa, "dimenticandosi" dell'opera reale.

⁸⁶ La corrispondenza tra il modello numerico e il monumento, è relativa al dato morfologico, metrico e spaziale, mentre non viene mantenuta la dimensione percettiva.

⁸⁷ Per un approfondimento si rimanda ad A. DE SANCTIS, *Il contesto della rappresentazione architettonica*, in G. TESTA, A. DE SANCTIS, *Rappresentazione e architettura. Linguaggi per il rilievo ed il progetto*, Roma Gangemi Editore, 2003; e ancora A. DE SANCTIS, *Dispositivi grafici per l'analisi dello spazio urbano*, in A. DE SANCTIS (a cura di), *Lo spazio urbano come tema. Il caso-studio del centro antico di Cosenza*, Roma Gangemi Editore, 2004.

⁸⁸ Tali grafici possono essere, sia di natura qualitativa (utili per trascrivere la geometria della

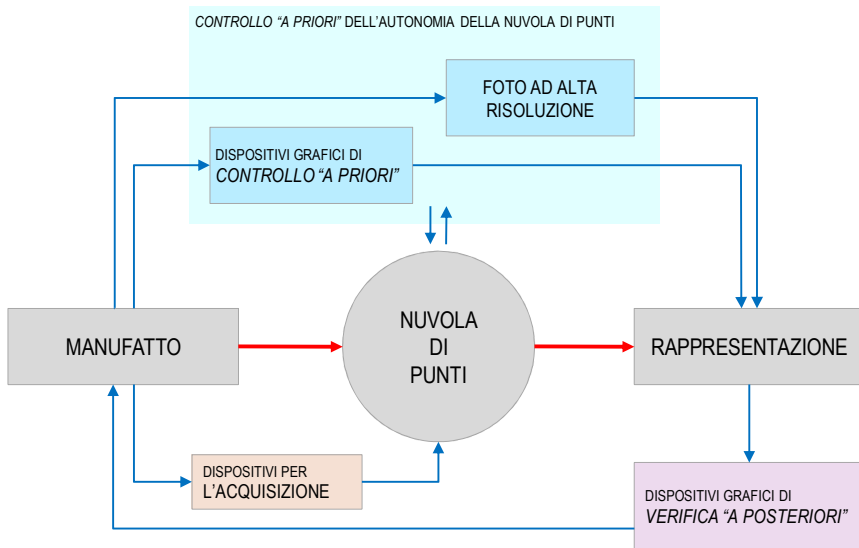


Fig. 3.3 – *Mapa concettuale della struttura operativa e dei dispositivi grafici proposti per controllare e limitare la tendenza all'autonomia della nuvola di punti.*

Infatti il confronto tra questi grafici e i dati metrici della nuvola di punti pone le basi per il recupero parziale del rapporto diretto, rilanciando il processo ciclico “autocorrettivo”, che è proprio del disegno inteso come linguaggio.

È necessario essere coscienti che “fissare il ricordo” con grafici, annotazioni, riferimenti metrici, etc., può – in qualche misura – indirizzare ed incanalare la rappresentazione finale dell’opera, condizionando il risultato, anche senza riproporre il rapporto eidotipo/elaborato grafico tipico del rilievo tradizionale. Infatti, questi elaborati, seppur affini agli eidotipi, non ne posseggono la stessa complessità e finalità operative, poiché non assumono il ruolo che li contraddistingue nel modo tradizionale di fare rilievo. Sono invece, una sorta una sorta di primo modello interpretativo, realizzato sulla scorta dei dati sensibili acquisiti *in situ*; degli “schemi preliminari”, che registrano aspetti della realtà per renderli disponibili, nel momento in cui si andrà ad operare sulla nuvola di punti.

Tuttavia, assieme ai modelli interpretativi “a priori” è opportuno prevedere una *verifica “a posteriori”* delle restituzioni grafiche dal modello digitale

forma, gli aspetti percettivi, ...), che quantitativa (atti a rilevare ambienti e/o elementi, che è opportuno ottenere con modalità di rilievo differenti dalla scansione *laser*).

usando gli strumenti del CAD.

Questi ultimi contribuiscono, ad accertare la rispondenza delle restituzioni finali con il manufatto reale, ottemperando, sia all'esigenza di adeguate verifiche, che al recupero della dimensione percettiva. In tal senso essi realizzano un contesto conoscitivo più ampio rispetto a quello offerto dal solo ambiente digitale.

Al pari dei dispositivi grafici di controllo "a priori", anche quelli di verifica "a posteriori", non possono essere considerati degli eidotipi, nel senso corrente del termine, ma hanno margini di sovrapposizione con il concetto e la struttura organizzativa di questi ultimi; piuttosto devono essere visti come un efficace sistema di controllo della rispondenza della rappresentazione, con l'oggetto reale⁸⁹.

In particolare, nel rilievo con *laser scanner* 3D si rende necessario predisporre degli elaborati grafici, realizzati dal vero a mano libera, per pianificare la campagna di scansione, ottimizzando il numero e la posizione degli *scanworld*, nonché l'appoggio topografico (se la registrazione viene fatta mediante una serie di *target*, o punti naturali, battuti da una poligonale d'appoggio tramite stazione totale). Questi disegni servono da promemoria nell'unione degli *scanworld* e non hanno né la complessità né la funzione dell'eidotipo tradizionalmente inteso.

In figura 3.4 è riportato, a titolo d'esempio, un dispositivo grafico messo a punto per controllare "a priori" un particolare della chiesa di Santa Maria

⁸⁹ Questo sistema di controlli e verifiche può essere visto come il sottile palesarsi del "vincolo di fisicità" che ancora l'uomo e la sua esperienza al mondo fisico. A tal proposito, Maldonado scrive: "Si dimentica che il nostro rapporto di esperienza individuale e collettiva con la fisicità del mondo non può essere cancellato con un colpo di bacchetta più o meno magica. Fa ormai parte di noi stessi, in quanto noi siamo, biologicamente ma anche culturalmente parlando, il risultato di un processo filogenetico in cui, come si sa, il suddetto rapporto di esperienza ha avuto un ruolo determinante. Piaccia o meno, noi siamo condannati, come tutti gli esseri viventi, a dover fare i conti con la nostra fisicità e con quella dell'ambiente. [...]. Non c'è dunque scampo al vincolo della fisicità. Si possono creare, come dimostrano ampiamente gli ultimi sviluppi dell'informatica, filtri e diaframmi che, a livello percettivo, sono in grado di allontanarci dall'esperienza diretta della fisicità. Ciò nonostante, è irragionevole congetturare, come qualcuno si azzarda a fare oggi, che gli uomini, nel loro vivere di ogni giorno, potrebbero alla lunga sbarazzarsi definitivamente della elementare e persino, si dice, troppo rozza ed ingenua esigenza di voler sempre e comunque toccare con mano le cose di questo mondo. In verità, manca ogni parvenza di prova che ciò effettivamente possa avvenire" T. MALDONADO, *Reale e virtuale*, Milano Feltrinelli, 2007 (1992, I ed.), p. 12.

Assunta (o del Ritiro) a Mesoraca. Il tema di questo elaborato è il disegno/studio dell'attacco a terra del pilastro, che separa l'abside dal transetto, oltreché del dislivello e della natura materica del pavimento. L'immagine registra il passaggio tra elementi verticali e pavimento, per renderlo disponibile nel momento di elaborazione della nuvola, anticipando con lo studio qualitativo della logica di aggregazione delle modanature, la loro definizione metrica.

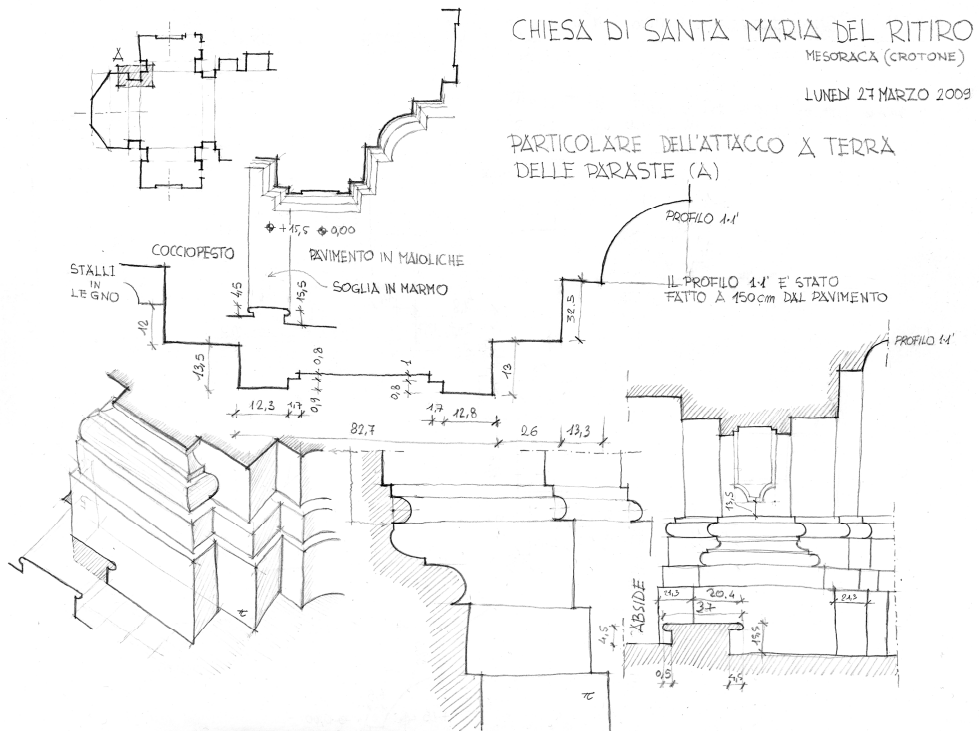


Fig. 3.4 – Chiesa di Santa Maria Assunta a Mesoraca (Crotone); dispositivo grafico di controllo “a priori”. Il tema di questo elaborato è il disegno/studio dell'attacco a terra del pilastro, che separa l'abside dal transetto, oltreché del dislivello e della natura materica del pavimento. L'immagine registra il passaggio tra elementi verticali e pavimento, per renderlo disponibile nel momento di elaborazione della nuvola, anticipando con lo studio qualitativo della logica di aggregazione delle modanature, la loro definizione metrica.

La “focalizzazione per gradi della percezione”, la “parzializzazione” del tema d'indagine e la “specializzazione” dell'elaborato, sono le invarianti che caratterizzano il dispositivo in figura.

In esso, la forma e l'aggregazione delle modanature sono descritte mediante

l'accostamento del profilo, della sezione e del prospetto con l'assonometria. Alle proiezioni ortogonali è demandato il compito di delineare le forme, mentre l'assonometria restituisce l'immagine dell'elemento attraverso la sua descrizione tridimensionale.

L'insieme degli elaborati grafici e la loro organizzazione stabilisce un "percorso visuale", fatto di continui rimandi tra disegni, che facilita la costruzione di un modello mentale esaustivo.

Le misure riportate non hanno il carattere esaustivo necessario per trascrivere in pulito il disegno, ma servono da controllo nel momento in cui si arriva a definire quantitativamente la geometria delle forme tramite la "manipolazione" della nuvola.

In ultimo, l'evoluzione dei rapporti coinvolge anche l'*iter* cognitivo legato al tradizionale disegno di rilievo e, di conseguenza, il *processo di produzione dei disegni*. Generalmente, esso ha inizio dalle informazioni estrapolate dal manufatto e riportate sotto forma di elaborati bidimensionali (piante, prospetti e sezioni); quindi, solo dopo aver disegnato/verificato questi ultimi, si costruisce il modello tridimensionale, oppure si passa a rappresentazioni che simulano la terza dimensione (assonometrie e prospettive), seguendo un percorso concorde alle possibilità, ai vincoli e ai condizionamenti propri degli strumenti e delle tecniche usate.

Anche in questo caso, la nuvola di punti sovverte l'ordine dei problemi e delle necessità operative, che danno luogo all'*iter* succitato: il punto di partenza diviene il modello tridimensionale e la sequenza di "generazione" dei grafici spinge a desumere gli elaborati bidimensionali dal modello spaziale (Fig. 3.5).

Per cui, alla base del processo cognitivo, si pone il modello digitale (sia numerico, che geometrico), in cui sono registrate le qualità dell'architettura. Esso rappresenta, da un lato, l'entità digitale (il documento) da cui è possibile estrarre informazioni, partendo dai dati oggettivi di cui è portatore; mentre, dall'altro, diventa l'ossatura morfologica e metrica su cui stratificare dati di diversa natura e provenienza (foto ad alta risoluzione, indagini diagnostiche, note storiche, sequenze evolutive, schede di classificazione, ...), con l'obiettivo di plasmare un sistema informativo, interrogabile dinamicamente e dal quale costruire situazioni conoscitive e dedurre dispositivi grafici innovativi atti a

descrivere.

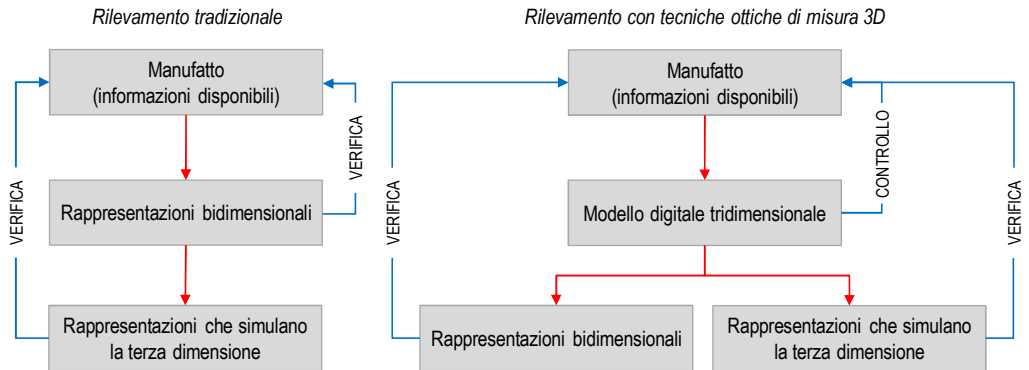


Fig. 3.5 – Diagrammi esemplificativi del processo di produzione dei disegni nel rilevamento tradizionale e con l'introduzione della nuvola di punti. L'evoluzione dei rapporti coinvolge anche l'iter cognitivo legato al tradizionale disegno di rilievo e, di conseguenza, il processo di produzione dei disegni. Generalmente, esso ha inizio dalle informazioni estrapolate dal manufatto e riportate sotto forma di elaborati bidimensionali (piante, prospetti e sezioni); quindi, solo dopo aver disegnato/verificato questi ultimi, si passa a rappresentazioni che simulano la terza dimensione (assonometrie e prospettive), seguendo un percorso concorde alle possibilità, ai vincoli e ai condizionamenti propri degli strumenti e delle tecniche usate. Anche in questo caso, la nuvola di punti sovverte l'ordine dei problemi e delle necessità operative, che danno luogo all'iter succitato: il punto di partenza diviene il modello tridimensionale e la sequenza di "generazione" dei grafici spinge a desumere gli elaborati bidimensionali dal modello spaziale.

3.3 Il manufatto simulato. Implicazioni, possibilità e potenzialità

L'assunto fondamentale da cui prende le mosse il nostro ragionamento, ravvisa nella tridimensionalità virtuale del manufatto "simulato", un sistema strutturato di dati in grado di schiudere nuovi scenari operativi/conoscitivi.⁹⁰ Infatti, nel considerare il modello tridimensionale come un documento digitale, portatore di informazioni e un mezzo potenzialmente in grado di generarne di

⁹⁰ La *Dichiarazione sul rilevamento architettonico* sottolinea l'importanza che il processo conoscitivo promosso dal rilevamento, sfoci nella costruzione di "un modello tridimensionale semplificato, attraverso il quale si potrà analizzare l'opera agevolando l'interpretazione delle sue fasi di trasformazione e dei suoi connotati riferiti alle diverse possibili tematizzazioni." AA.VV., *Atti del Convegno: Il Rilievo dei Beni Architettonici per la Conservazione* (Roma, 2000), Roma MG Sistemi Editoriali, 2005, p. 471.

nuove, si riconosce in esso la possibilità di promuovere analisi e di articolare l'esplorazione, in maniera certamente differente e forse più accurata e completa, rispetto ai mezzi, strumentali e concettuali, sinora utilizzati.

Nell'analisi, il modello affianca il manufatto, per realizzare una dualità che non è contrapposizione, ma stimolo per compiere percorsi cognitivi inusitati e fornire ulteriori chiavi di lettura per i fenomeni architettonici, con il fine di far emergere i significati di un'architettura. Il manufatto reale mantiene la sua centralità nel processo di conoscenza, ma il baricentro dell'*iter* conoscitivo è condiviso tra lo stesso manufatto e il suo simulacro virtuale.

In sostanza, la "costruzione" di modelli digitali non deve essere soltanto un modo per trasporre il mondo reale in uno "virtuale", o peggio per creare un universo popolato da repliche dell'architettura reale, ma per esplorare consapevolmente le possibilità che il modello digitale rende attuabili, scandagliando le molteplici modalità con cui possiamo percepire/capire/rappresentare l'architettura.

È opportuno notare che i modelli tridimensionali a cui si fa riferimento, descrivono, mediante una rappresentazione continua, o discreta, un involucro modellato sulle forme reali (interne ed esterne) del manufatto. In sostanza, questa "pelle" registra, in maniera accurata, la geometria delle forme, nonché l'apparenza delle superfici reali (finiture e trattamenti, aspetto cromatico, alterazioni e degradazioni).

Le potenzialità, di un siffatto sistema di conoscenze, possono essere intese, sia in termini di *espansione delle capacità analitico-operative*, rispetto alle rappresentazioni della geometria descrittiva, alle usuali tecniche grafiche e alle possibilità manipolatorie dei tradizionali plastici, che come *approccio visuale dinamico interattivo* con il manufatto indagato, o meglio, con il suo simulacro digitale. Nel primo caso, agli esiti figurativi propri degli strumenti e dei metodi canonici, se ne affiancano altri, caratterizzati da una spiccata pertinenza con la tecnologia che li ha resi possibili. Le indagini promosse dall'interazione rilevatore-modello tridimensionale, difficilmente attuabili con gli strumenti consueti, tendono, infatti, a dar luogo ad una multiforme gamma di rappresentazioni, che sfruttano le caratteristiche della nuova tecnologia; il modello consente di andare oltre la bidimensionalità del supporto tradizionale, sia esso cartaceo che elettronico. Possiamo effettuare una navigazione virtuale:

muoverci sopra/sotto, dentro/fuori e attraverso gli spazi di un'architettura, ma anche, interrogare il modello⁹¹.

D'altro canto, se si considera il ruolo dell'interazione dinamica tra utente e modello digitale, registriamo un'evoluzione del tradizionale ciclo cognitivo nella costruzione/fruizione delle immagini, dovuto all'introduzione del modello (e delle possibilità di interagire con esso) nel processo di produzione delle immagini. Questo secondo punto pone in essere due aspetti sostanziali e gravidi entrambi di conseguenze:

- l'opportunità/necessità di instaurare un "dialogo" creativo, con il modello tridimensionale e le informazioni che da esso è possibile estrapolare, realizzando modalità, per molti versi nuove, sia nella fase in cui si costruiscono le conoscenze, che in quella della fruizione;
- la possibilità di considerare il modello come un documento digitale e, in maniera duale, lo spazio virtuale in cui avviene la modellazione (intesa come scelta del metodo, delle procedure, delle modalità operative e del *software*), come potenziale innesco del processo cognitivo e parte integrante della conoscenza stessa.

Il rilevatore esplora lo spazio virtuale del modello mediante una serie (potenzialmente infinita) di punti di vista da lui scelti. Si serve di viste prospettiche e punti di vista inusuali, fino ad utilizzare centri di proiezione all'infinito, generando assonometrie e proiezioni ortogonali; rende trasparenti parti del modello per evidenziare le relazioni tra spazio interno e volumi esterni, lo seziona e ne materializza i volumi ideali che lo descrivono per studiarne la morfologia e la *metria*, quindi, lo scostamento delle forme reali dalla matrice ideale. Infine, posiziona *ad hoc* una o più sorgenti luminose per far risaltare le forme, le deformazioni, le tracce incise, o per simulare gli effetti di luce originari. Tutte queste possibilità di manipolazione del modello (ed altro ancora) sono altrettante opportunità analitiche difficilmente praticabili da

⁹¹ La pertinenza, in questo caso, è da intendersi come "efficacia" in termini di qualità dei risultati e dei tempi necessari per raggiungerli. E a ben vedere, sono i fattori *qualità e tempi* ad orientare la rappresentazione verso modalità grafico-analitiche peculiari dell'universo di mezzi, tecniche e procedure adottate, in altre parole, della tecnica di cui ci si serve. Infatti, la realizzazione di elaborati canonici tradizionali, presenta tempi di lavorazione più lunghi rispetto ad immagini raddrizzate (ed eventualmente anche elaborate) ottenute dalla nuvola di punti.

chi osserva la tridimensionalità di una prospettiva, fissata su un supporto bidimensionale⁹².

In sostanza, l'*approccio visuale dinamico interattivo* è da intendersi, sia nella sua accezione di “strumento” d'indagine, che fa dell'*esplorazione* del modello il suo punto di forza – con tutto ciò che ne consegue rispetto alla tradizionale *osservazione* –, sia nel senso, meno immediato del precedente, di mezzo in grado di concentrare e dirigere l'attenzione verso la comprensione dei significati di un'architettura.

Ragionando direttamente sul modello⁹³, si aprono nuovi scenari nella ricerca di legami tra gli aspetti dell'edificio, le relative forme e relazioni tra di esse vengono rese palesi e disvelano il nesso causale con la risultante architettonica. Relazioni che, in molti casi, sono più difficili da cogliere “leggendo” solo piante, prospetti e sezioni.

In particolare, se da un lato, le proiezioni ortogonali “riducono” la tridimensionalità di un manufatto ad un unico piano, obbligando “l'osservatore ad un processo di astrazione per immaginare l'oggetto nella sua spazialità”⁹⁴, dall'altro, la riduzione al piano permette di cogliere, in maniera diretta, l'organizzazione degli ambienti e degli spazi, gli allineamenti, i moduli, ...; ed ancora, gli spessori dei muri, la disposizione e la geometria delle strutture portanti e così via. In generale, se la genesi formale deriva da una logica bidimensionale, con questo tipo di elaborati risulta più agevole risalire all'idea di progetto. All'opposto, un processo di formazione concepito per

⁹² E, se l'autore del disegno non coincide con chi conduce l'indagine, l'interattività con il manufatto è limitata all'interpretazione di quella particolare vista costruita da un altro, o per dirla con le parole di Riccardo Migliari: “egli vede, in sostanza, con gli occhi di un altro, l'autore della prospettiva, che ha scelto per lui cosa vedere e come vederlo” (R. MIGLIARI, *La prospettiva e Panofsky*, in “Disegnare, idee immagini”, anno XVI, vol. 31, dicembre 2005, p. 35). Oltretutto, lo stesso autore associa, giustamente, l'atto dell'esplorazione alla *prospettiva dinamica interattiva*, fissando, attraverso il termine prescelto, il concetto del perlustrare, del percorrere, dell'esaminare, ..., cioè del movimento (virtuale e non più fisico), anche per meglio esemplificare la contrapposizione con l'osservare, proprio della *prospettiva statica della tradizione*. Sull'argomento si veda anche R. MIGLIARI (a cura di), *Introduzione alla prospettiva dinamica interattiva*, in *Prospettiva dinamica interattiva. La tecnologia dei videogiochi per l'esplorazione di modelli 3D di architettura*, Roma Edizioni Kappa, 2008, pp. 6-17.

⁹³ O con il modello, perché il termine “ragionare” può anche essere inteso in senso letterale, come sinonimo di discorrere, conversare, parlare, ...

⁹⁴ M. CANCIANI, *I disegni di progetto. Costruzioni, tipi e analisi*, Torino CittàStudi Edizioni, 2009, p. 33.

accostamenti, intersezioni, sovrapposizioni, sottrazione di volumi, o per variazioni spaziali tra parti simili, viene compreso meglio se letto sul modello tridimensionale.

L'azione figurativa tradizionale, legata alla rappresentazione su un supporto piano, spesso raggiunge la sua massima capacità analitica, con l'accostamento di immagini realizzate con metodi proiettivi, tecniche grafiche e scale di rappresentazione differenti, che agiscono con logiche di rimando da un elaborato all'altro, per evidenziare, interpretare e chiarire un particolare aspetto dell'opera. Un "contesto" grafico di tal genere, è in grado di stimolare riflessioni e di attivare nell'autore che esegue gli elaborati (ma, anche in un soggetto terzo), un potenziale di reazione che determina lo sviluppo della comprensione di un'opera.

Il "dialogo" tra rilevatore, opera da rilevare e restituzioni prodotte, dà luogo, in sostanza, ad un percorso ciclico "autocorrettivo" che, attraverso un meccanismo di anticipazione/correzione, porta a comprendere i molteplici aspetti del manufatto indagato. In maniera analoga a quanto avviene nei processi percettivi, ad ogni ulteriore ciclo, si ridefiniscono le informazioni già acquisite e le relazioni tra di esse, fino a precisare ed arricchire il modello mentale posseduto dal rilevatore e, quindi, a dare origine all'"incremento cognitivo", obiettivo del processo di conoscenza messo in atto con il rilevamento. Contemporaneamente, lo stesso rilevatore amplifica e perfeziona le proprie capacità di osservazione ed interpretazione, affinando l'attitudine all'analisi e l'abilità a cercare e trovare relazioni.

L'azione figurativa tradizionale, resa possibile da un contesto grafico appositamente costruito, fonda la sua efficacia operativa nella *mobilità* della rappresentazione (intesa come sintesi percettiva-interpretativa), la quale costituisce un fattore indispensabile dell'analisi architettonica⁹⁵.

Invece il modello si offre già nella sua compiuta tridimensionalità, rendendo concreta la possibilità di far emergere i significati più direttamente legati agli

⁹⁵ Sull'argomento si veda A. DE SANCTIS, *Il contesto della rappresentazione architettonica*, in G. TESTA, A. DE SANCTIS, *Rappresentazione e architettura. Linguaggi per il rilievo ed il progetto*, Roma Gangemi Editore, 2003, pp. 39-70; A. ZAPPANI, *Procedure e metodi per il rilievo. Concetto e finalità dell'eidotipo*, in A. DE SANCTIS, G. FORTUNATO, F. PARISE (a cura di), *Strategie didattiche e di ricerca. Il Rilievo dell'Architettura e la Rappresentazione del Territorio*, Edizioni Kappa, Roma, 2011, pp. 71-88.

assetto volumetrici del manufatto oggetto d'indagine.

Anche in questo caso è lecito parlare di “dialogo” creativo che si instaura tra modello virtuale e ricercatore: l'ambiente virtuale (*hardware* e *software* per la modellazione, il modello tridimensionale, la navigazione nello spazio virtuale e l'interrogazione del modello) diventa il contesto analitico nel quale (e tramite il quale) sviluppare proficui confronti rilevatore-modello, stimolare approfondimenti e accrescere la conoscenza.

Il concetto di mobilità, fattore attivo del disegno tradizionale, si ripresenta nel nuovo contesto mantenendo inalterato il principio ispiratore, ma con un ruolo operativo differente. Alla *mobilità* della rappresentazione, propria di un contesto grafico tradizionale di disegni interrelati, si sostituisce l'interazione diretta con e sul modello e la possibilità di sfruttare appieno le nuove tecnologie (tecniche ottiche di misura 3D, sistemi di realtà virtuale e di realtà aumentata).

A nostro avviso è auspicabile che le nuove modalità analitiche conservino i principi fondanti del contesto grafico tradizionale, cioè che non annullino le opportunità di studio della rappresentazione tradizionale. L'analisi condotta sul modello dovrebbe concretizzarsi in più contesti grafici capaci di fondare la loro efficacia, sia sui fattori attivi della rappresentazione tradizionale (parzializzazione del tema, specializzazione del dispositivo d'indagine, complementarità dei grafici e loro organizzazione secondo logiche di rimando ed approfondimento, uso di modalità proiettive e rapporti scalari, selezione dei segni, ...), che sulle nuove possibilità, proprie della tecnica usata, dando luogo ad esiti figurativi e di studio innovativi.

3.4 *Differenze e similitudini (apparenti) con il plastico tradizionale*

La realizzazione del plastico, a scala edilizia o urbana, è tuttora un passaggio analitico-progettuale importante, non completamente sostituito dall'utilizzo di prodotti digitali (realtà virtuale, modelli tridimensionali, immagini olografiche, ...), che caratterizza l'era informatica e tecnologica

odierna. Anzi, il plastico, affiancando proprie modalità conoscitive agli apparati figurativi tradizionali, amplia le opportunità della rappresentazione e si propone come dispositivo, sia per il *controllo*, la *verifica* la *divulgazione* degli esiti finali del processo progettuale, che per implementare le strategie conoscitive⁹⁶.

La “traduzione” con i plastici di una determinata scelta compositiva, consente di controllarne le valenze formali e, pertanto, di orientare il progettista tra più ipotesi possibili: il plastico riesce a garantire il controllo di alcune tra le variabili, che intervengono nel processo progettuale, con il risultato di “convincere” il progettista stesso delle proprie scelte, fino ad anticipare l’opera finita.

D’altro canto, riveste un ruolo non secondario anche nella presentazione dell’esito progettuale ai non addetti ai lavori, che molte volte non hanno confidenza con il disegno tecnico⁹⁷. Esso dà luogo ad una modalità comunicativa diretta ed efficace, poiché rappresenta una replica in scala dell’opera, realizzata con colori, materiali e trattamenti superficiali analoghi a quelli dell’opera finita, o con riferimenti “astratti” ad essa, che non prevedono l’attivazione dei processi di astrazione e decodifica, propri delle trasformazioni proiettive.

Il plastico arriva a dare corporeità a un’opera (ad un’architettura, a una città, o ad un oggetto di *design*), rendendola quasi “tangibile”, oltre che immediatamente visibile, in ogni sua parte⁹⁸.

Nel processo progettuale, il plastico ha spesso la funzione di “matrice” creativa dell’idea di progetto, proprio per la capacità di mostrare i volumi e il loro assemblaggio, l’organizzazione degli elementi, il bilanciamento e le proporzioni tra le parti. Attraverso di esso si opera una simulazione formale,

⁹⁶ L’intreccio tra nuove tecnologie e plastico è alla base della strategia progettuale di Frank Gehry. I modelli di studio, che spesso precorrono i disegni, sono realizzati con materiali poveri e facilmente modellabili, senza rimandi all’opera finita, se non per la forma. A valle di questo processo creativo, la forma, ormai raggiunta una configurazione “stabile”, viene fissata con plastici di grandi dimensioni, quindi scandita e riversata in digitale. Da questo prototipo digitale vengono estrapolati i protoelaborati e, da questi, le successive elaborazioni grafiche.

⁹⁷ Non è infrequente, che il plastico venisse posto nel cantiere come riferimento per le maestranze.

⁹⁸ Parallelamente a quanto avviene per la scultura, nella costruzione del plastico è fortemente presente l’aspetto di modellazione fisica: se ne plasmano le forme e si giustappongono i volumi, in tal modo, la replica prende corpo.

che risulta indispensabile ogniqualvolta le forme architettoniche sono difficilmente rappresentabili sul piano e laddove le immagini risultano meno efficaci.

Il plastico non esaurisce le sue potenzialità nella duplice essenza di strumento creativo/divulgativo, poiché le informazioni di cui è portatore possono innescare ulteriori strategie conoscitive per la comprensione degli assetti del manufatto che riproduce e per il ricostruirne le tappe evolutive, sempre nell'ottica del rilevatore che pone questioni e trova le risposte ai suoi interrogativi, sfruttando tutte le risorse a sua disposizione (restituzioni grafiche, modelli virtuali, ...). E, tra queste, bisogna annoverare il plastico.

Si pensi alle potenzialità che lo studio dei plastici realizzati nel passato e il loro raffronto con il manufatto reale, può avere:

- nel “decifrare” le cause dello scarto tra idea e realizzazione;
- nel cogliere i motivi delle variazioni funzionali e compositive;
- nel vagliare le soluzioni percettive, a cui avrebbe dato luogo un'ipotesi progettuale differente, almeno in parte, da quella realizzata.

Ed ancora, astraendo dall'episodio specifico, l'attenta analisi di tutti i plastici, sia di studio che finali, realizzati per uno determinato manufatto, rimanda direttamente alla modalità di progettare dell'architetto e, pertanto, a comprendere le sue procedure operative.

Ma se la consuetudine di realizzare i plastici è una tappa fondamentale per controllare/verificare gli assetti progettuali di un'opera e per comprendere appieno la tridimensionalità del manufatto, quindi, la sua articolazione volumetrica, l'interazione cognitiva plastico/osservatore può, a volte, portare ad errate previsioni percettive. A tal proposito, Rudolf Arnheim, pur riconoscendo alla figurazione plastica un potere formativo primario, sottolinea come l'opera architettonica è *“una struttura di enormi dimensioni, veduta e fruita da piccole creature”* e *“le esperienze visive che ne risultano sono qualitativamente diverse da quelle effettuate allorché si osserva un modellino”*⁹⁹.

Nel rapporto che si instaura tra l'uomo e l'opera reale, le parti sono invertite e ne risulta rovesciata la relazione tra le sue dimensioni e quelle dell'edificio; di conseguenza, l'esperienza connessa con l'esplorazione dello spazio

⁹⁹ R. ARNHEIM, *La dinamica della forma architettonica*, Milano Feltrinelli, 1985, p. 143, 144.

architettonico risulta alquanto differente¹⁰⁰. Da queste prime considerazioni emerge come un limite della figurazione attraverso i plastici, la difficoltà di percepire lo spazio costruito, i giochi di luce e le esperienze sensoriali, che nascono dall'interazione tra l'uomo e la spazialità degli ambienti (Fig. 3.6).



Fig. 3.6 – Progettisti con i loro plastici. L'interazione cognitiva plastico/osservatore può, a volte, portare ad errate previsioni percettive, non tanto nella valutazione dell'articolazione spaziale dei volumi, ma nella percezione dello spazio costruito, dei giochi di luce e delle esperienze sensoriali, che nascono dall'interazione tra l'uomo e la spazialità degli ambienti.

Questa limitazione può essere superata attingendo alle possibilità che le

¹⁰⁰ Sull'argomento, Bruno Zevi scrive: "affinché la rappresentazione plastica fosse perfetta, bisognerebbe supporre che una composizione architettonica abbia valore solo per i rapporti che esistono tra le varie parti che l'articolano, indipendentemente dallo spettatore; [...]. Ciò è ovviamente assurdo: il carattere di ogni opera edilizia è determinato, sia nello spazio interno che nella volumetria muraria, da un elemento fondamentale, la scala, cioè il rapporto tra le dimensioni dell'edificio e le dimensioni dell'uomo." B. ZEVI, *Saper vedere l'architettura. Saggio sull'interpretazione spaziale dell'architettura*, Torino Edizioni di Comunità, 2000, p. 45.

nuove tecnologie mettono a disposizione e, in particolar modo, alle potenzialità offerte dalla realtà virtuale. Anzi, la tendenza alla dematerializzazione, cioè la spinta di queste tecnologie verso “*un progressivo assottigliarsi della materialità del mondo*”¹⁰¹, porta sempre più a spostare l’attenzione su “*costrutti illusori con funzione vicaria, sostitutiva e addirittura alternativa nei confronti della realtà*”¹⁰² e, conseguentemente, a trasferire l’azione conoscitiva in ambienti artificiali interattivi.

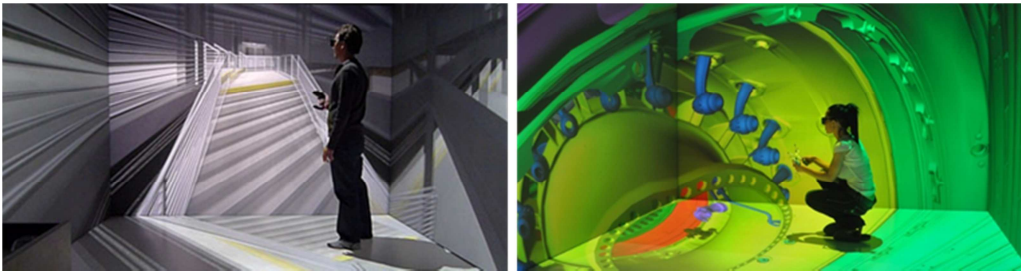


Fig. 3.7 – Realtà virtuale; sistema immersivo-inclusivo Eon Icube™ prodotto dalla Eon Reality.

Il termine realtà virtuale, nel nostro caso, copre un ampio spettro di significati, includendo tipologie differenti di realtà artificiale: da quella in cui l’operatore è completamente immerso in un ambiente tridimensionale interattivo e vive in prima persona le esperienze percettive, mediate da periferiche non convenzionali (occhiali, casco, *dataglove*, ...), a quella in cui l’operatore vede in “terza persona”, dall’esterno, il suo *alter ego* immerso nell’ambiente tridimensionale. Senza trascurare le situazioni in cui l’operatore interagisce con il *computer* per simulare una partecipazione interattiva e dinamica con quanto appare nel *monitor*, muovendo gli oggetti, camminando attorno, o all’interno di essi, avvicinandosi, o allontanandosi.

Infine, il contenuto semantico del termine può essere dilatato fino ad includere tutte le manipolazioni, modifiche e cambiamenti che l’operatore applica al modello tridimensionale tramite l’interfaccia grafica del *software* e dei dispositivi *hardware*.

Il confronto tra plastico convenzionale e lo spazio tridimensionale simulato, fruito con livelli differenti di virtualità, non si esaurisce nel solo parallelismo

¹⁰¹ T. MALDONADO, *op. cit.*, p. 10.

¹⁰² Ivi, p. 14.

percettivo legato alla fisicità del plastico, ma porta a considerazioni di ordine generale che coinvolgono tutto l'*iter* creativo/conoscitivo/comunicativo e, quindi, la totalità dei modi convenzionali di rappresentare.

I modelli digitali tridimensionali, lo spazio virtuale in cui essi “vivono” e, di conseguenza, i sistemi *hardware* e *software* necessari per gestire la navigazione/esplorazione interattiva, sono da considerare un'efficace “struttura” per la simulazione del manufatto, una vera e propria interfaccia conoscitiva della realtà. Questa struttura permette un'interazione più approfondita e articolata rispetto al plastico, tanto da “*coprire, in un unico sistema di rappresentazione, la totalità dell'arco di modellazioni possibili: da un lato, di fornire le medesime prestazioni dei classici modelli iconici, dall'altro, di quelli non iconici (modelli diagrammatici e matematici)*”¹⁰³.

Sia la figurazione tradizionale, che la realtà virtuale, simulano con tecniche grafiche e risultati differenti, lo spazio tridimensionale e la verosimiglianza con l'oggetto reale, ma tra i due sistemi di rappresentazione ci sono variazioni sostanziali, sia nelle modalità di fruizione dello spazio, che di imitazione della somiglianza.

Nella rappresentazione tradizionale, ad esempio, la scelta della prospettiva, la costruzione della “narrazione” grafica e la struttura figurativa che la rende possibile (la sequenza di lettura dinamica tra i vari piani di profondità, il taglio prospettico, gli artifici grafici, ...), creano una partecipazione attiva all'interpretazione dell'immagine.

L'osservatore decifra lo spazio e gli elementi architettonici, secondo i vari livelli di significato compresenti, per creare una personale rappresentazione “interna”; opera, cioè, una continua ricostruzione soggettiva della realtà, mediata dall'immagine, che legge attraverso i propri schemi percettivi e i riferimenti culturali.

A differenza di questo tipo di interazione tra fruitore/rappresentazione, nel corso della navigazione virtuale si sviluppano altre situazioni percettive: nel caso di ambienti immersivi-inclusivi, si ha l'impressione di essere in uno spazio reale, alla presenza di oggetti concreti, di condurre fisicamente l'esplorazione e di interagire con essi. In tal modo è possibile l'apprendimento spaziale, non mediato da meccanismi ricostruttivi e dal linguaggio della

¹⁰³ Ivi, p. 104.

rappresentazione. Le azioni (modellazione, manipolazione, interrogazione, navigazione, ...) danno luogo a *feedback* percettivi tra il fruitore e l'ambiente virtuale che, adeguatamente interrelati, plasmano un costrutto mentale atto a descrivere le dimensioni, le forme e i volumi simulati.

Lo spazio viene percepito, anche nelle sue caratteristiche emozionali e, se a questo si aggiunge la possibilità di azioni conoscitive impossibili da mettere in atto nella realtà fisica, come, ad esempio, l'eliminazione di parti stratificate nel tempo per avere una visione del manufatto originario, il completamento di un'opera non finita attingendo ai riferimenti progettuali della stessa (elaborati grafici, plastici, ...), la messa in evidenza di relazioni spaziali rendendo traslucidi specifici elementi e così via.

3.5 *Il modello 3D come sistema di dati integrati. Oltre la geometria e l'apparenza delle superfici*

Sinora abbiamo considerato il modello tridimensionale al pari di un "involucro" plasmato sulle forme del manufatto; una sorta di guscio che trattiene soltanto i dati relativi alla morfologia e all'apparenza visibile delle superfici esterne/interne, valutando l'entità e la qualità delle trasformazioni e le formidabili opportunità grafico-analitiche, che la presenza del modello conferisce all'azione di conoscenza condotta con il rilevamento.

Queste opportunità si amplificano notevolmente se prendiamo atto che il modello, oltre ad essere interrogabile, manipolabile ed esplorabile virtualmente da punti di vista differenti, può diventare il nucleo intorno a cui aggregare ulteriori livelli informativi, organizzati gerarchicamente a formare una struttura articolata di dati e informazioni di natura diversa.

In questo modo viene a definirsi un *sistema informativo*, basato sul modello tridimensionale, che ricompone le conoscenze, limitando (o, al limite, eliminando) la frammentarietà dei dati, delle informazioni e delle indagini strumentali e grafiche che, usualmente, si producono con il rilevamento. Il modello diviene un'interfaccia conoscitiva attraverso cui si organizza e si

gestisce il materiale riguardante il manufatto (documenti iconografici e fotografici, disegni, schede, risorse audio/video, *database*, ...); parallelamente, tale interfaccia permette l'esplorazione dei dati (interagendo direttamente con il modello) e rende possibili ricerche e interrogazioni che generano ulteriori conoscenze, difficilmente attuabili con gli strumenti usuali¹⁰⁴. Si crea, quindi, un potenziale innesco per esplorare percorsi conoscitivi, che sfruttano le modalità "ipertestuali" con cui si organizzano le risorse del sistema.

In un tale sistema informativo, l'integrazione dei dati può esser fatta, sia referenziando le informazioni visive sul modello, mediante la stratificazione di *layer* finalizzati per contenere immagini (termografie, immagini in luce UV, ...), o elaborazioni tematiche (codifica dello stato di degrado, lettura degli alzati, sequenza delle fasi costruttive, ricostruzioni ipotetiche ...), che mediante riferimenti a *database* esterni (schede, disegni, ...).

A nostro avviso, un sistema informativo siffatto, cioè caratterizzato dalla stratificazione di informazioni di natura diversa, dalla strutturazione delle conoscenze in un sistema unitario, dal modello tridimensionale come base su cui è imperniato il sistema, dalla flessibilità dello strumento nel dar vita a interrogazioni articolate e complesse, è potenzialmente in grado di operare un sostanziale mutamento:

- nelle *modalità di azione dell'interprete*, sia in termini di archiviazione, visualizzazione, esplorazione, analisi, che di trasmissione delle conoscenze acquisite;
- nella *costruzione di un sistema di conoscenze aperto*, cioè implementabile con l'aggiunta di nuovi livelli informativi e con l'aggiornamento dei dati;
- nella *promozione dell'analisi interdisciplinare*, creando occasioni di confronto tra saperi prodotti da diverse competenze e ponendo i presupposti per un proficuo scambio culturale.

Infine, questo complesso eterogeneo di conoscenze, ricomposto in un contesto unitario, si configura come un formidabile mezzo per la conservazione in forma digitale di informazioni sul patrimonio culturale; contesto unitario che garantisce la diffusione e l'accesso a dati scientificamente rilevanti a chi opera

¹⁰⁴ In sostanza, possiamo avere uno o più modelli "navigabili", costruiti con un differenti livelli di dettaglio e calati nel contesto ambientale, su cui sono referenziate apporti conoscitivi di varia natura, eterogenei per finalità e qualità.

nella ricerca. Inoltre, le stesse conoscenze registrate nel sistema, diversamente finalizzate, possono essere strumento di valorizzazione, comunicazione e fruizione, oltre che mezzo operativo, nella gestione, nella conservazione e nel recupero del patrimonio.

CAPITOLO 4

LE RESTITUZIONI AI TEMPI DELLE TECNICHE OTTICHE DI MISURA 3D

4.1 *La restituzione grafica come “contesto”*

Il rilevamento organizza i risultati di un percorso d’analisi – all’interno di una struttura più o meno complessa, che aggrega informazioni di diversa natura (disegni, note storiche, documenti iconografici e fotografici, indagini diagnostiche, ...) – con l’obiettivo di realizzare un sistema di conoscenze per la l’analisi e la comprensione di un manufatto edilizio, o di una struttura urbana.

Il processo interpretativo, messo in atto con il rilevamento, procede secondo uno schema triadico, in cui il manufatto architettonico, il rilevatore e i disegni di restituzione interagiscono in un continuo dialogo, che si sviluppa non seguendo un percorso lineare, ma ciclico, con un costante affinamento e revisione delle informazioni dedotte dall’oggetto e dalla sua rappresentazione¹⁰⁵. Questo meccanismo consente, da un lato, di approfondire la conoscenza dell’opera, attraverso successive modifiche e precisazioni, dall’altro migliora le capacità di osservazione ed interpretazione del rilevatore stesso.

In questo quadro, la rappresentazione costituisce un vero e proprio “contesto

¹⁰⁵ Questo ragionamento mantiene invariata la sua valenza, anche in presenza della nuvola di punti, cioè di un ulteriore soggetto che interviene nel processo, con le rettifiche e le considerazioni già viste nel capitolo precedente.

creativo”, che agisce da strumento attivo nell’analisi del manufatto edilizio, stimolando la formazione del pensiero e incoraggiando “*possibilità d’incontro (non solo proiettive) tra i diversi disegni e soprattutto tra disegni ed autore. Possibilità capaci di prospettare soluzioni o contraddire quelle già acquisite confrontando, ad esempio, grafici con punti di vista (con scale o tecniche...) differenti*”¹⁰⁶.

A nostro avviso, l’azione figurativa, raggiunge il suo massimo potenziale analitico, quando l’utilizzo contemporaneo di immagini, realizzate con metodi di proiezione, tecniche grafiche, punti di vista e scale di rappresentazione differenti, produce un “contesto” grafico in grado di attivare, nell’autore e nel fruitore dei disegni, un potenziale di reazione, che “provoca” uno sviluppo progressivo delle conoscenze. Sviluppo dovuto, sia all’accresciuta quantità di informazioni che l’accostamento di diversi metodi proiettivi comporta, che alla diversa organizzazione dei dati raccolti. Ogni dispositivo grafico è fatto di disegni ma anche di regole combinatorie e se l’organizzazione cambia, i singoli disegni e le loro parti acquisiscono nuovo valore e significato. La contemporanea possibilità di raffronto tra disegni proiettivamente differenti (piante, prospetti, sezioni, assonometrie, ...), dà vita ad un processo interpretativo che opera con logiche di continui rimandi da un elaborato all’altro, per esaminare e chiarire un determinato aspetto dell’opera (Fig. 4.1).

Il risultato grafico di questo processo può, ad esempio, concretizzarsi in un modello organizzativo in cui tutte le figure elaborate hanno lo stesso “peso”, oppure strutturarsi attorno ad una figura predominante. Nel primo caso, nessun disegno assume un rilievo maggiore ed ognuno di essi è legato agli altri, al fine di definire una gerarchia di rapporti tra grafici, con meccanismi di rinvio tra di essi. Nel caso in cui è una singola figura a presentarsi come immagine emblematica del “carattere” di una determinata opera (o di una sua parte), tutto l’intero percorso si articola intorno a questa, che diviene fulcro di aggregazione dell’ulteriore produzione grafica e punto “focale” dell’intera rappresentazione. Inoltre, anche se il protocollo organizzativo dei disegni è differente rispetto a quello “sequenziale”, persistono le gerarchie e i rapporti tra i singoli grafici, mentre nell’ossatura dei meccanismi di rinvio, da un’immagine all’altra,

¹⁰⁶ G. TESTA, A. DE SANCTIS, *Rappresentazione e architettura. Linguaggi per il rilievo ed il progetto*, Roma Gangemi Editore, 2003, p. 40.

assume una posizione predominante la figura centrale.

In questa cornice ogni disegno prodotto risponde ad una particolare esigenza, trascrive un dato aspetto e prende corpo mediante un dispositivo grafico di analisi, più o meno complesso, per affrontare una problematica ben delimitata.

Alla “parzializzazione” del tema d’indagine corrisponde una “specializzazione” del dispositivo grafico, anzi ogni singola immagine, all’interno del campo grafico definito dal dispositivo, si specializza e delimita il proprio ambito d’indagine, ponendo in essere una sorta di adattamento alle necessità operative (Fig.4.1).

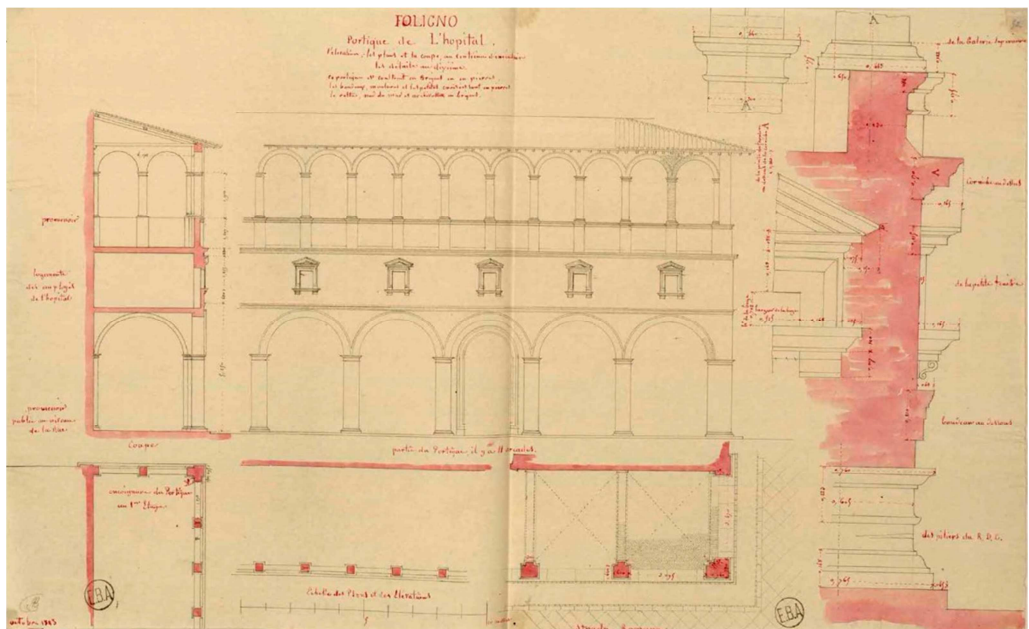


Fig. 4.1 – Guillaume-Abel Blouet, portico dell’ospedale di Foligno (*Ensemble de dessins de Toscane, 1823-1825*).

Indipendentemente dall’opportunità di realizzare dispositivi grafici, in cui più disegni operano simultaneamente per falsificare/confermare un’ipotesi di lavoro (o per chiarire un particolare aspetto e prescindendo dal modello organizzativo scelto per mettere in connessione tali disegni), ogni rappresentazione riflette il percorso cognitivo del rilevatore e, prima ancora di avere una *valenza comunicativa*, si caratterizza per una forte *valenza “significativa”*.

Queste due determinanti, o meglio, il rapporto comunicazione/significazione è una delle peculiarità che contraddistingue la rappresentazione, la cui variabilità origina situazioni figurative costruite, sia per promuovere “*possibilità d’incontro*” tra i disegni e l’autore (che hanno una bassa valenza comunicativa, ma fortemente orientati verso la significazione), che contesti grafici con l’obiettivo della comunicazione delle conoscenze acquisite e la descrizione di ipotesi definite con certezza (cioè considerate valide dall’autore). I primi sono contesti grafici sostanzialmente indirizzati alla formazione dell’idea (concetti interpretativi, ...), ma che nel contempo non escludono possibilità comunicative, mentre i secondi, sono essenzialmente volti all’esposizione dell’idea ormai consolidata.

Infine, è opportuno annotare che ciascun disegno è il risultato della traduzione in immagini di un processo cognitivo, che ha inizio con un atto percettivo; pertanto, non è la semplice registrazione sensoriale della realtà, ma è l’interpretazione del manufatto, filtrata dagli *schemi* del percettore e dalla sua *matrice culturale*. Il rilevatore “costruisce”, cioè, una sua proiezione mentale dell’opera, sulla scorta di propri processi cognitivi (connessi alla percezione visiva) e dei dati oggettivi che raccoglie *in situ*.

A tal proposito è opportuno ricordare i meccanismi del processo di formazione dell’immagine, richiamando, brevemente, la teoria sulla percezione proposta da Ulric Neisser¹⁰⁷ e le tesi di psicologia percettiva di Ernst H. Gombrich¹⁰⁸.

Nel modello proposto da Neisser, l’informazione visiva non è soltanto il risultato degli stimoli dell’ambiente, esito di sensi più o meno recettivi, ma di

¹⁰⁷ Cfr. U. NEISSER, *Conoscenza e realtà. Un esame critico del cognitivismo*, Bologna Il Mulino, 2000 (ed. or. *Cognition and Reality. Principles and Implications of Cognitive Psychology*, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1976).

¹⁰⁸ Il critico e storico dell’arte Ernst H. Gombrich, occupandosi di psicologia percettiva applicata al campo dell’arte ed in particolar modo della rappresentazione pittorica, espone una teoria che ha molti punti di contatto con quella di Neisser. Tale teoria si basa sulla realizzazione di un sistema di classificazione che si avvale di una serie di “*schemi iniziali*” per interpretare la realtà e trascriverla in termini di rappresentazione pittorica, oltre che sull’uso di un continuo meccanismo di aggiustamento e correzione degli schemi stessi. La teoria è esposta in *Art and Illusion. A Study in the Psychology of Pictorial Representation*, opera pubblicata nel 1959 (*Arte e Illusione. Studio sulla psicologia della rappresentazione pittorica*, trad. italiana 1965).

un processo attivo di anticipazione/correzione promosso dal percettore.¹⁰⁹ La percezione visiva è basata su particolari strutture cognitive, gli *schemi anticipatori*, in grado di captare alcune tra le informazioni di cui il manufatto è portatore¹¹⁰.

Quindi lo “schema” indirizza l’osservazione¹¹¹ e soprintende alla raccolta delle informazioni, mettendo in atto un’attività ciclica autocorrettiva di esplorazione. Lo schema *dirige* l’esplorazione dell’oggetto, *seleziona e raccoglie* le nuove informazioni rese disponibili dal processo di interazione percettore/oggetto; queste ultime *modificano* lo schema originario, rendendolo adatto a raccogliere ulteriori informazioni, attraverso una nuova esplorazione.

La selezione delle informazioni non deve, dunque, far pensare allo schema come ad una struttura “statica”, immutabile (ognuno vede soltanto ciò che già sa cercare), ma come ad un ente “dinamico”, che si trasforma ad ogni successivo ciclo e la cui cifra significativa non è da ricercare nella creazione di “una replica interiore laddove non esisteva prima, bensì nell’alterazione dello schema percettivo cosicché l’azione successiva sarà svolta in maniera diversa”¹¹².

Inoltre, il prodotto del processo cognitivo, lungi dall’essere un costrutto avulso dal mondo reale, rappresenta la mediazione tra i dati di senso, le informazioni ambientali e la sfera dell’intelletto, messa in atto dal percettore per costruire, o più propriamente, per “ricostruire” la realtà. Neisser arriva a

¹⁰⁹ A tal proposito Neisser scrive: “la percezione è certamente un processo costruttivo, ma ciò che viene costruito non è un’immagine mentale che appare alla coscienza dove è contemplata da un uomo interiore. In ogni momento il percettore costruisce anticipazioni di determinati tipi di informazione, che gli permettono di accettare tale informazione man mano che essa diventa disponibile.” U. NEISSER, op. cit., p. 40.

¹¹⁰ Neisser riprende e modifica il concetto di schema proposto da Frederic Bartlett negli anni Trenta, il quale – a sua volta – lo mutua da un’idea di Otto Selz e di Henry Head degli anni Venti. A tal proposito Neisser scrive: “mi sembra che non esista parola migliore di quella coniata da Bartlett, e cioè *schema*, per definire la struttura cognitiva centrale nell’ambito della percezione (però Bartlett non ne era completamente soddisfatto e neppure io).” U. NEISSER, op. cit., p. 69. Per un maggiore approfondimento sulle tesi di Bartlett si veda F. C. BARTLETT, *La memoria. Studio di psicologia sperimentale e sociale*, Milano Franco Angeli Edizioni, 1974 (ed. or. *Remembering. An Experimental and Social Study*, Cambridge, Cambridge University Press, 1932).

¹¹¹ Il percettore costruisce gli schemi in base alla propria storia personale, sia stratificando le esperienze fatte e i dati sensoriali provenienti dall’ambiente circostante, che sovrapponendo le sovrastrutture culturali e disciplinari proprie della sua formazione.

¹¹² U. NEISSER, op. cit., p. 72.

definire la percezione e l'attività cognitiva come *transazioni* tra il percettore e l'ambiente circostante “*che non si limitano puramente a informare il percettore, ma anche a trasformarlo*”¹¹³.

Anche per Ernst Gombrich, la traduzione in immagini del mondo visibile si avvale di un articolato complesso di schemi e, quindi, di un sistema classificatorio evoluto. Infatti, ogni volta che ci troviamo di fronte ad un oggetto, sia esso “*consueto*” o “*inconsueto*”¹¹⁴, scegliamo tra gli schemi posseduti quello che meglio lo approssima, cioè operiamo una prima classificazione temporanea. Nel caso di un oggetto *consueto*, abbiamo già nel nostro armamentario classificatorio uno schema adatto a descriverlo, mentre di fronte ad uno *inconsueto* è necessario partire dallo “*schema iniziale consueto*”, che meglio si adatta a descriverlo, per poi modificarlo e renderlo aderente alla realtà osservata.

Questo percorso di confronto e adattamento dello schema iniziale alla realtà da rappresentare si sviluppa in un contesto ben definito, nell'ambito di una tradizione stratificata, che veicola prassi consolidate e influssi stilistici; pertanto una qualunque rappresentazione nasce all'interno di una determinata matrice culturale. Non esiste una *tabula rasa* da cui partire, ma ogni precedente rappresentazione, o descrizione verbale dell'oggetto tende ad influenzare le successive. Tali influenze si concretizzano sotto forma di modelli precostituiti di un determinato oggetto, posseduti dal percettore e che sono testimonianza del citato meccanismo per rappresentare una forma: l'*incipit* è dato dallo schema che funge da “*modulo*” o “*formulario preesistente*”, all'interno del quale fissare gli elementi peculiari dell'oggetto osservato. Ma “*come spesso avviene con i moduli*”, scrive Gombrich, “*se questi non hanno spazi previsti per informazioni di un certo genere che noi consideriamo essenziali, tanto peggio per le informazioni!*”¹¹⁵, prospettando uno schema che opera una selezione delle informazioni, ma al contempo adattabile, quindi atto ad essere modificato.

¹¹³ Ivi, p. 32.

¹¹⁴ I due termini, mutuati da Gombrich, sono da intendere come sinonimi di conosciuto e sconosciuto.

¹¹⁵ E. H. GOMBRICH, op. cit., p. 87.

4.2 Caratteri delle restituzioni grafiche. Una raccolta di esempi

Considerazioni preliminari

Il mezzo tecnico, come abbiamo già sostenuto in questo scritto, indirizza non solo le procedure operative, ma informa tutto l'*iter* conoscitivo del rilevamento, compresa la fase di restituzione grafica dell'opera. Le tecniche di misura 3D sono di per se stesse "fattori attivi" per la formazione del pensiero, ovvero agiscono come "stimolatori" di nuove opportunità per la documentazione accurata di un manufatto, per l'analisi dello stato attuale, per la visualizzazione interattiva (esplorazione, manipolazione, presa delle misure, ...), per la simulazione virtuale del restauro di un'opera, per la comunicazione "dinamica" (filmati, ologrammi, ...) delle ipotesi interpretative, per la valorizzazione e così via.

I disegni e le immagini degli esempi riportati costituiscono un compendio di esiti figurativi per indagare i modi con cui le tecniche ottiche di misura 3D incidono sulla restituzione, sollecitando nuovi percorsi per affrontare le questioni del rilevamento tradizionale e, nel contempo, proponendone/imponendone di nuove, in accordo con le proprie potenzialità e possibilità operative.

Seppur nella differenza degli stili e dei metodi proiettivi, in questi elaborati è possibile rintracciare caratteri comuni, sia di *efficacia* analitica/descrittiva/comunicativa che di *pertinenza*.

In merito alla struttura organizzativa degli elaborati, notiamo che soltanto alcune rappresentazioni grafiche sono formate da più elaborati (differenti per metodo proiettivo, scale di rappresentazione, tecniche grafiche, ...), che interagiscono tra loro attraverso connessioni e rimandi, anche complessi, in grado di dar vita ad un "meccanismo" di analisi capace di concentrare in un solo dispositivo grafico, le determinanti di un'architettura o di una sua parte. Mentre la prassi comune è di sviluppare più immagini, pensate come situazioni figurative separate, piuttosto che strutturate all'interno di un contesto grafico unitario. In questo secondo caso, anche se si arriva a produrre più elaborati concorrenti, non viene predisposto nessun tessuto interpretativo in grado di connetterli all'interno di un sistema (grafico ed esplicito, cioè appositamente concepito e realizzato) di rimandi logici, ma viene demandato alla vicinanza tra

le immagini stesse e, spesso, anche alle descrizioni che le accompagnano, il compito di creare il contesto creativo di cui diciamo.

Nelle restituzioni l'*efficacia* è la capacità di far emergere l'aspetto indagato e le qualità del rappresentato, mediante un dispositivo grafico costruito *ad hoc*. I mezzi concettuali e le procedure operative adoperate per raggiungere tale obiettivo variano in funzione dell'autore e della tecnica usata, ma presentano sempre alcune invarianti (non tutte contemporaneamente usate negli elaborati analizzati): la limitazione del campo d'indagine ad una specifica questione (*parzializzazione* del tema d'indagine); la "messa a punto" dei disegni per condurre l'analisi (*specializzazione* delle immagini); l'uso simultaneo e convergente di più figurazioni realizzate, sia a scala differente e tecniche grafiche dissimili, che con metodi proiettivi e/o punti di vista diversi (*complementarietà* delle raffigurazioni); la *somiglianza* e la *distanza* con la realtà, usate come possibilità per favorire la lettura critica.

Con il disegno l'autore normalmente veicola significati, costruendo un suo "punto di vista" sulla realtà, tramite procedure di selezione, parzializzazione ed enfasi delle informazioni da trasmettere. D'altronde, lo scambio comunicativo tra l'autore della rappresentazione e il fruitore, non è solo una questione di codifica/decodifica dei segni, ma prevede anche processi inferenziali, tramite i quali, l'ipotesi interpretativa più pertinente (o più adatta), viene ri-costruita in base al contesto grafico realizzato e al tipo di significato veicolato. La *pertinenza* di un tale contesto è correlata alla capacità di evidenziare e trasmettere significati, tenendo presente che l'efficacia si basa, sia sulla "qualità" delle singole figure, che sulla loro disposizione.

È quindi possibile costruire più contesti grafici equivalenti per finalità, ma contraddistinti da un differente livello di pertinenza, poiché alcuni riescono ad analizzare/descrivere, in maniera più *efficace* di altri, situazioni formali, circostanze tecnologiche e così via. Inoltre, l'efficacia non è soltanto una questione interna tra l'autore e i suoi disegni, ma va anche stabilita in relazione al "destinatario" per il quale il dispositivo grafico viene pensato e prodotto.

Le figure che seguono, con la conseguente descrizione sintetica, sono un espediente per esemplificare gli esiti grafici correnti, esplicitando le peculiarità delle modalità grafiche adottate. Ognuna di esse suggerisce un contesto operativo in cui l'autore indaga uno o più significati dell'opera e, nel loro

insieme, offrono una raccolta eterogenea di strategie grafiche, adoperate per promuovere situazioni conoscitive (analitiche, descrittive, espositive, ...).

Un'ulteriore considerazione, segnalata già in precedenza, è relativa alla tendenza alla verosimiglianza delle rappresentazioni; verosimiglianza che presenta indubbi vantaggi, nel potenziale incremento di significati della rappresentazione e possibili limiti che, sostanzialmente, sono riconducibili allo sviluppo di un processo percettivo "passivo", alla sottovalutazione del valore della scala di rappresentazione e alla propensione a trascurare determinate situazioni conoscitive e relativi risultati figurativi (analisi delle logiche compositive, studio del rapporto forma-tecnologia, ...).

Si tratta di una tendenza forse irreversibile, ma è indispensabile tener presente che la ricerca dell'illusione del vero è una costante della storia della rappresentazione architettonica¹¹⁶ (Fig. 4.2).

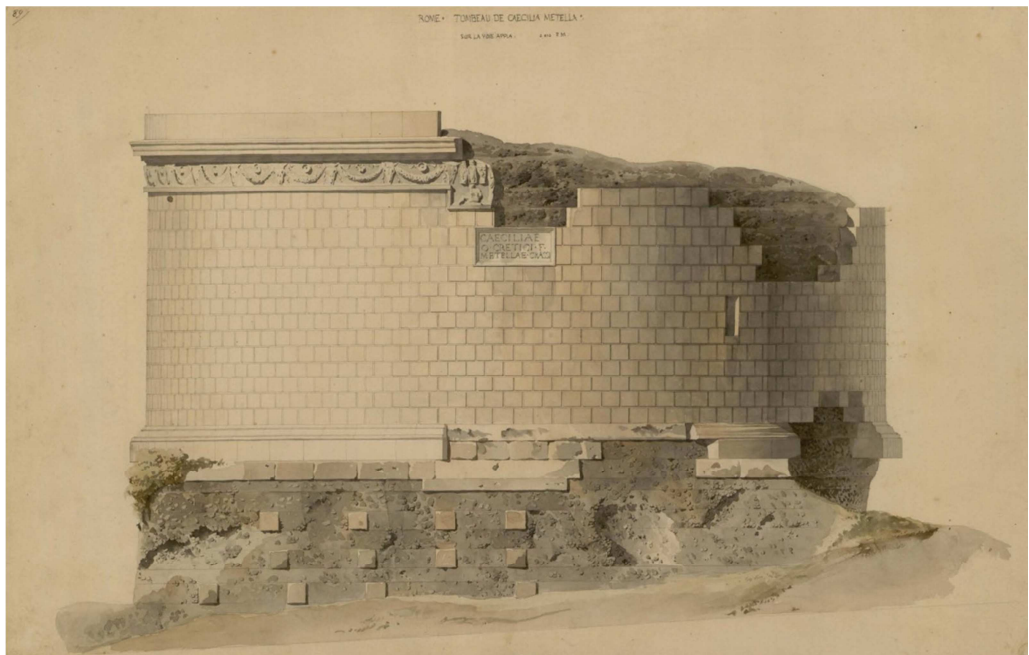


Fig. 4.2 – Felix Duban, Mausoleo di Cecilia Metella (l'Album de dessins d'architecture effectués par Félix Duban pendant son pensionnat à la Villa Medici, entre 1823 et 1828. Tome 1, Rome).

Alla scala di rappresentazione è solitamente correlata la *focalizzazione per*

¹¹⁶ Cfr. T. MALDONADO, *Reale e virtuale*, Milano Feltrinelli, 2007.

gradi della percezione, cioè la progressiva discesa dal generale al particolare, in un percorso di avvicinamento cognitivo. È prassi consolidata che la scala di rappresentazione venga usata per precisare la forma e l'apparenza di un elemento o di un manufatto mediante elaborati sempre più definiti: si selezionano i segni, si schematizzano le geometrie e si usa un complesso di simboli grafici per i disegni a grande scala, recuperando la somiglianza con le forme reali a piccola scala.

L'uso congiunto della nuvola di punti e del disegno informatico capovolge radicalmente le modalità operative fin qui seguite per definire le forme dell'architettura. Il "mezzo" digitale, infatti, mette a disposizione un ambiente di lavoro illimitato nel quale disegnare, senza fissare preventivamente la scala grafica, anzi considerando un'incredibile potenzialità il poterla variare ogni volta se ne presenti la necessità e ravvisando nelle "modifiche istantanee" un punto di forza nel controllo del procedimento grafico¹¹⁷.

Operativamente, nel passaggio discreto/continuo, ovvero nella generazione di un modello geometrico continuo (*mesh*, NURBS, ...) dalla nuvola di punti, in una prima fase si considera limitatamente la scala e/o l'incertezza dell'elaborato finale¹¹⁸; si cerca di ritenere tutte le informazioni metriche offerte dalla discretizzazione per punti, senza dare luogo a scollamenti eccessivi dal modello numerico e conseguente perdita di informazioni; In tal modo si dà origine ad un modello *master* costruito per ottenere un'approssimazione, morfologica e metrica della nuvola di punti, qualitativamente e quantitativamente elevata in tempi ragionevolmente contenuti. Si persegue, cioè, l'obiettivo di un modello continuo con un basso livello di soggettività, da poter essere usato come base per tutti gli altri modelli, caratterizzati in funzione dello scopo e con differenti livelli di dettaglio.

Il valore della scala di rappresentazione, trascurato nella definizione del modello *master*, viene ristabilito con la codifica di quest'ultimo attraverso modelli geometrici con diverso grado di approssimazione (metrico, morfologico e percettivo) al dato reale. Questi tre fattori, di cui la scala metrica

¹¹⁷ Qui si intende la possibilità di *zoom in/zoom out* per avvicinarsi o allontanarsi dall'oggetto a seconda delle esigenze.

¹¹⁸ Fermo restando che il *range* di utilizzabilità del modello geometrico è vincolato alle modalità di acquisizione della nuvola di punti (passo di campionamento, parametri dello *scanner*, ...).

è portatrice, sono regolati dall'introduzione di *soglie di restituzione*, che definiscono livelli di somiglianza via via crescenti con la situazione reale, al diminuire del fattore di scala e, quindi, all'aumentare del dettaglio nella restituzione.

Tali livelli calibrano la rispondenza rappresentato-rappresentazione sia dal punto di vista metrico che percettivo, utilizzando la "distanza" d'osservazione dell'oggetto reale e si concretizzano negli elaborati grafici sotto forma di *soglie di tolleranza* di cui avvalersi per decidere se accettare o meno il valore di una misura effettuata e come *soglie di accuratezza* nella restituzione di modelli analogici, iconici o simbolici, variamente distanti/somiglianti dalla/alla realtà.

Le *soglie di tolleranza* intervengono nella descrizione morfologica e metrica dei disegni, ponendosi come discriminie nel considerare ammissibile, ad una data scala, una misura affetta da una determinata incertezza. Inoltre, è sulla base di queste soglie che si stabilisce la liceità dell'approssimazione metrica del modello geometrico scelto, cioè se quest'ultimo può andare bene per codificare le forme ad una scala prefissata, oppure è necessario un modello con una complessità diversa (maggiore o minore in funzione del rapporto scalare in questione).

Le *soglie di accuratezza*, sono l'equivalente di quelle di tolleranza nella scelta delle modalità e delle tecniche di restituzione grafica. Queste agiscono definendo il grado di somiglianza del disegno alla realtà, passando da modelli analogici o simbolici, con riferimenti più o meno "deboli" alla situazione reale, a modelli iconici, di elevato realismo (trattamento superficiale, colore, materiali, dissesto e degrado e così via).

Prodotti di immagine

Una prima categoria di dispositivi grafici rappresenta l'esito dell'elaborazione della nuvola di punti, o del modello continuo (*mesh*, superfici NURBS, ...), con l'intento di ottenere delle immagini *raster* che possano diventare dei validi "surrogati" degli elaborati tradizionali, per affiancare/sostituire gli elaborati canonici al tratto ed ampliarne le possibilità grafiche; in ogni caso, indipendentemente dalla natura del modello da cui sono

originate, siamo di fronte a figurazioni “piane”, anche nel caso di figure che simulano la terza dimensione.

Appartengono a questo gruppo gli *snapshot* raddrizzati, o meno ed eventualmente trattati, sia all’interno dello stesso *software*, che genera/gestisce il modello tridimensionale, sia in ambiente CAD (quotatura, sovrapposizioni di profili, analisi geometrico-formali, ...), o con programmi di fotoritocco.

Tali restituzioni, facilmente deducibili dalla nuvola di punti, o dal modello poligonale, affiancano gli elaborati canonici, anzi possiamo dire che si pongono in competizione con essi poiché, in molti casi, tendono anche a sostituirli. Possiamo pensare a queste figurazioni, sia come possibili “surrogati” *tout court* di piante, prospetti, sezioni, ..., che come “base di supporto” su cui condurre analisi tematiche (mappatura del degrado e del dissesto, lettura degli alzati, ...).

Pertanto, il modello tridimensionale – indipendentemente dalla sua natura discreta o continua – diventa un fattore attivo nel momento in cui “spinge” verso soluzioni grafiche conseguibili con tempi di elaborazione nettamente inferiori a quelli dei disegni al tratto (tradizionale o informatico che sia), senza inficiare la qualità dei risultati finali.

In realtà questo ruolo d’indirizzo non è limitato all’esito grafico finale, cioè al “contenitore” che racchiude l’analisi, ma informa i modi d’indagare i significati di un’architettura, poiché dobbiamo sempre tener presente che si analizza mentre si disegna¹¹⁹. In questo senso il disegno, è uno strumento essenziale nella formazione del pensiero, cioè è il “contesto creativo” in cui viene progressivamente definita l’idea iniziale, tramite inferenze ed approssimazioni successive.

L’analisi e la rappresentazione procedono parallelamente e si sviluppano in stretta correlazione: la scelta del metodo proiettivo, la selezione/enfaticizzazione dei segni, il “taglio” e la posizione del punto di vista di una prospettiva, ..., fino alla “costruzione” del dispositivo grafico più appropriato, non sono rigidamente fissati a priori (anche se vi è sempre un sostrato costituito da

¹¹⁹ “Nel porsi a disegnare emergono gli equivoci, le incomprensioni, le imprecisioni e le lacune di un modello mentale di organizzazione dello spazio, impensabili al momento di certe intuizioni iniziali, illusoriamente esaurienti come certe immagini oniriche: disegno non solo per trasmettere quanto acquisito, ma processo, non sempre agevole, lungo il quale il pensiero progressivamente matura ed il sapere si conquista.” G. TESTA, A. DE SANCTIS, op. cit., p. 28.

sistemi di modellazione da cui partire), ma la loro compiuta definizione, o meglio il progressivo aggiustamento, nasce da un costante adattamento operativo, originato dal dialogo tra il manufatto, il rilevatore, i disegni e, se presente, anche la nuvola di punti. La singola figura, o il dispositivo di “partenza”, può anche essere corretto man mano che si disegna, se si delineano nuove ipotesi interpretative e relazioni che necessitano di ulteriori approfondimenti, non previsti dal percorso di conoscenza inizialmente predisposto.

Gli elaborati, derivati dalla “manipolazione” della nuvola di punti (viste assonometriche e prospettiche, immagini “raddrizzate” in pianta, prospetto e sezione, ...), sintetizzano diverse strategie grafiche per la descrizione degli assetti volumetrici, della tessitura muraria, l’analisi delle forme e così via. Ogni immagine affronta, solitamente, un determinato aspetto, che si concretizza in un dispositivo grafico, più o meno complesso, secondo la logica di “parzializzare” il tema d’indagine e “specializzare” il dispositivo stesso.

La figura 4.3 è composta da una sequenza di quattro “fermo immagini”, dedotti dalla nuvola di punti, senza nessuna elaborazione successiva e relativi ad una traiettoria virtuale, intorno alla chiesa del complesso del Patirion (Rossano, Cosenza); in questo caso l’aspetto della somiglianza è prevalente: l’architettura viene rappresentata “così come appare”, senza nessuna selezione degli elementi, manipolazione dei colori, o altri artifici grafici utili per far emergere ulteriori significati.

Se, da un lato, questo tipo di immagini rappresentano un modo rapido e, molto spesso, efficace per avere delle viste prospettiche (o assonometriche), sin dalle prime fasi del rilevamento, dall’altro mostrano, solitamente, una serie di “sbavature”, che in misura differente è possibile ritrovare in quasi tutti gli *snapshot*: la sovrapposizione/giustapposizione di parti con differente risoluzione, la presenza di lacune nel modello, la difformità di colori tra nuvole scandite in condizioni di luce non omogenee, la presenza di elementi estranei all’architettura del manufatto (persone, arredi, recinzioni, ...) ¹²⁰.

¹²⁰ Queste osservazioni sui vantaggi e sui limiti delle viste prospettiche in figura, possono assumere carattere generale ed essere estese a tutti gli *snapshot* derivati dalle nuvole di punti.

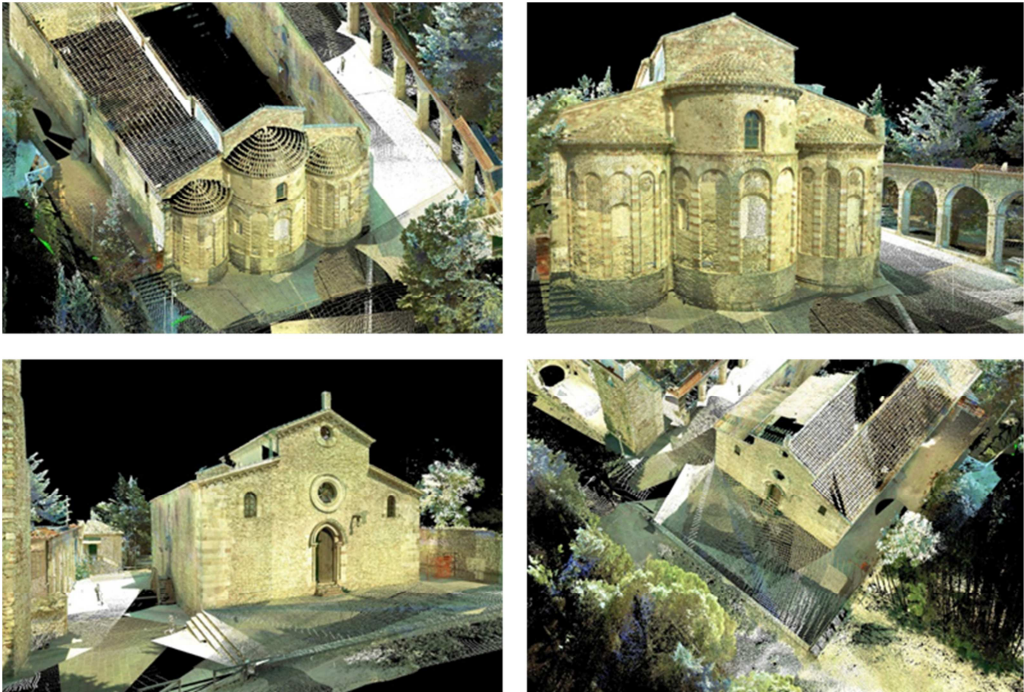


Fig. 4.3 – *Complesso architettonico del Patirion (Rossano); viste prospettiche della chiesa* (Laboratorio di Rilievo dell'Architettura, Unical 2006).

Le immagini riportate nelle due figure seguenti, sono anch'esse dedotte dalla nuvola di punti, ma con un grado di elaborazione maggiore rispetto alle precedenti.

La figura 4.4, relativa all'interno della rotonda di San Lorenzo a Mantova, illustra la possibilità di mappare in maniera speditiva¹²¹ le aree affrescate, sfruttando la riflettanza per evidenziare i lacerti della pittura e riducendo a sfondo la struttura muraria, mediante l'uso di toni di grigio¹²². Si tratta di un procedimento grafico di selezione/enfatizzazione dei segni, operazione comunemente praticata nel disegno tradizionale e informatico, che in questo caso è riproposta in una veste diversa¹²³.

¹²¹ Il termine è da intendere come sinonimo di "rapido", ma non necessariamente di "poco preciso".

¹²² La riflettanza si è rivelata, in alcuni casi, utile per evidenziare i giunti nella muratura e la variazione tra materiali differenti, per eliminare l'ombra presente sul paramento murario e per la mappatura del degrado.

¹²³ Oltretutto, la procedura di selezione può essere automatizzata, poiché i *software* di gestione

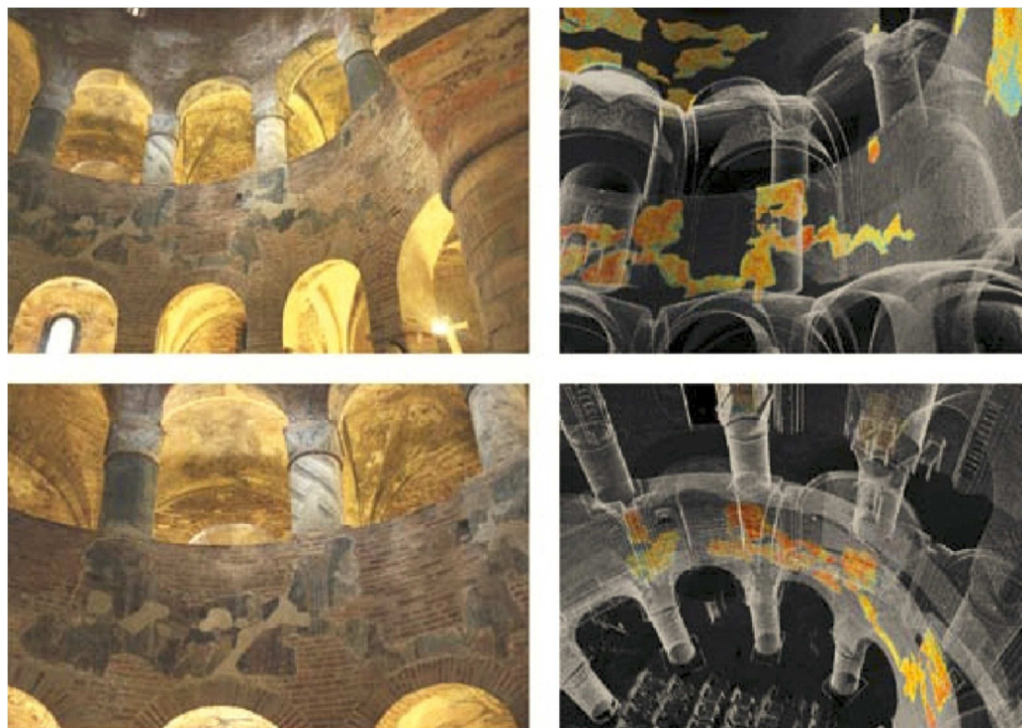


Fig. 4.4 – Rotonda di San Lorenzo (Mantova); mappatura delle aree affrescate (DIAPReM, Unife).

La figura 4.5 mostra l'interno della chiesa di Sant'Andrea a Mantova, sezionato in pianta e in alzato lungo l'asse mediano della navata, per dar vita ad una lettura concorrente tra parti sezionate e prospetto interno. L'assonometria sezionata si presta bene a descrivere l'organizzazione tridimensionale, riproducendo i rapporti metrici tra le parti, la volumetria interna, la forma e la posizione (in pianta) della cripta. Il dispositivo è completato dalla sezione longitudinale del sistema di facciata, che sottolinea la particolare soluzione compositiva dell'opera.

Si tratta, in definitiva, di un dispositivo che all'originaria nuvola di punti, sezionata per mostrare l'interno, sovrappone i profili orizzontali e verticali (ottenuti dalla nuvola in ambiente CAD) per rendere più "leggibile" l'impianto planimetrico e l'articolazione spaziale.

delle nuvole consentono di distinguere i punti in base al valore della riflettanza.

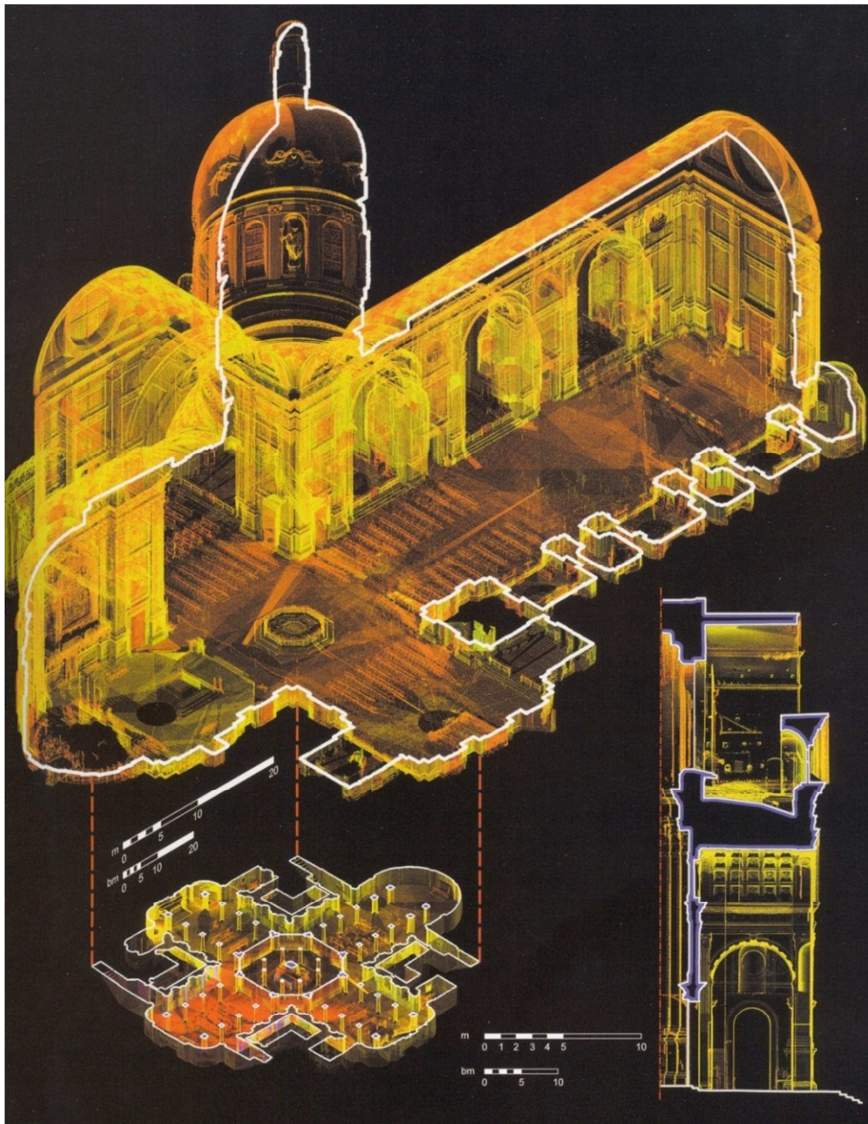
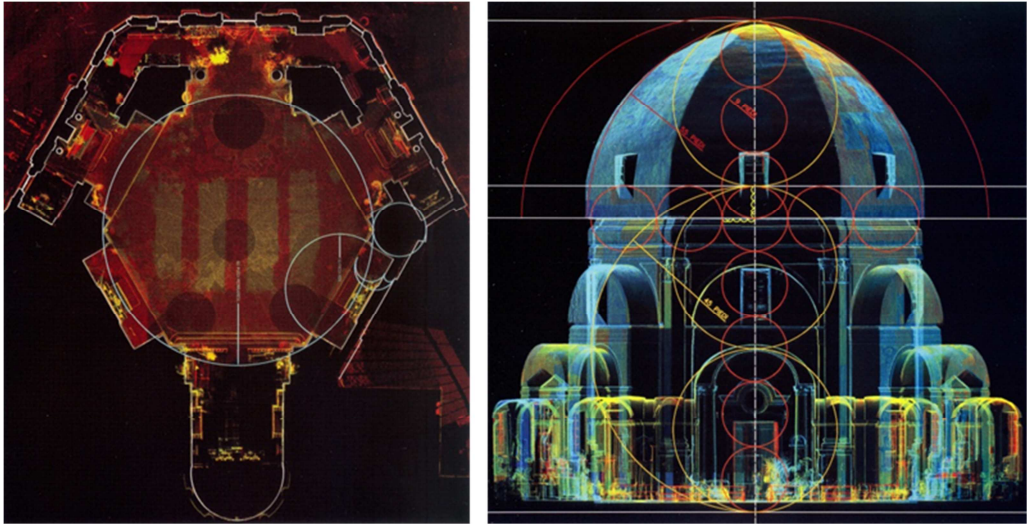


Fig. 4.5 – chiesa di Sant’Andrea (Mantova); assonometria sezionata dell’interno, della cripta e sezione longitudinale del sistema di facciata (DIAPReM, Unife).

Un’ulteriore possibilità (Figure 4.6a,b e 4.7) consiste nel ricavare *snapshot* “raddrizzati” della nuvola, che fungono da base per le successive elaborazioni. Le figure 4.6a,b sono finalizzate alla ricerca formale, cioè vengono usate per formulare un’ipotesi sulla logica compositiva e sulle unità di misura adoperate nel progetto e nella costruzione della chiesa di Santa Maria del Quartiere

(Parma); mentre dalla seconda vengono ricavate le forme e l'aspetto superficiale del paramento murario di una parte del portico del chiostro del Patirion.



Figg. 4.6a,b – Chiesa di Santa Maria del Quartiere (Parma); ipotesi sulla logica compositiva e sulle unità di misura (C. VERNIZZI, 2008).

In queste ultime tre figure (Figg. 4.4, 4.5 e 4.6a,b), il valore della somiglianza non è più dominante, ma è consapevolmente attenuato per dare una maggiore leggibilità alle tematiche (mappatura delle aree affrescate, organizzazione dello spazio interno, logiche compositive) che, di volta in volta, l'autore indaga. L'operazione di *parzializzazione dell'indagine* e *specializzazione del dispositivo* è declinata con modalità grafiche differenti, ma il dato di partenza è sempre la necessità/opportunità di individuare, separare e scegliere le condizioni più favorevoli per evidenziare e veicolare efficacemente i significati esplorati, riducendo o eliminando le reciproche interferenze che genera la compresenza di più caratteristiche e che, molto spesso, sono un fattore di disturbo all'interpretazione.

La figura 4.7 esplicita quanto detto sulle soglie adoperate nella restituzione mediante disegni a scale diverse di una porzione del lato nord del portico del chiostro del Patirion. Il passaggio discreto/continuo è fatto secondo modalità e criteri già esposti in precedenza: abbiamo costruito il modello *master* che descrive il portico (archi, pilastri, capitelli, base,) e da questo dedotto gli

elaborati in scala 1/100 ed 1/50.¹²⁴

Sulla base della rispondenza metrica¹²⁵ alle soglie anzidette e mantenendo il riscontro percettivo con il dato reale, abbiamo ricostruito le forme alla scala prescelta. Ad esempio, alla scala 1/100 abbiamo adottato, come forma geometrica degli archi, una semicirconferenza che descrive un arco a tutto sesto, mentre gli stessi, alla scala 1/50, sono delineati con un profilo geometrico che approssima meglio il dato reale, ma possiede un livello di schematizzazione inferiore.

Per la mappatura dei materiali abbiamo elaborato un modello *simbolico*, in scala 1/100, che attua il trasferimento informativo mediante sistema di simboli univocamente determinati, senza creare connessioni figurative verosimili; mentre la tessitura muraria è efficacemente descritta da un modello *iconico* in scala 1/50, che attraverso segni a forte legame figurativo con l'immagine reale, la riproduce realizzando una struttura percettiva simile a quella reale¹²⁶.

Alla categoria dei “prodotti di immagine” appartengono anche i dispositivi grafici basati sulle elaborazioni derivate dal modello continuo (poligonale, superfici NURBS, ...). Tali dispositivi, anche se simili negli usi a quelli ottenuti dalla nuvola di punti, hanno potenzialità analitiche di gran lunga superiori, soprattutto quando si tratta di descrivere – in maniera verosimile e accurata – l'apparenza di una superficie.

Gli *snaphot* desunti da modelli fotorealistici sono un utile mezzo figurativo per rappresentare la cromia delle superfici, le pitture parietali, la tessitura dei paramenti murari, la mappatura dello stato di dissesto e degrado, ..., non solo al fine di documentare lo stato attuale di un'architettura, ma anche per operazioni analitiche (lettura degli elevati, studio del meccanismo di dissesto, monitoraggio quantitativo del quadro fessurativo, ...).

¹²⁴ In origine le immagini in figura sono disegnate in scala 1/100, ad esclusione della tessitura muraria che parte da un rapporto scalare di 1/50. Nel definire le soglie di tolleranza alle diverse scale, abbiamo fatto coincidere l'incertezza con l'errore di graficismo (2-3 decimi di millimetro).

¹²⁵ La rispondenza metrica del modello geometrico a quello poligonale ad una determinata scala è stata valutata attraverso punti di controllo atti a definire la distanza tra i due modelli, che servono per definire l'accettabilità o meno di una scelta fatta in relazione alle soglie di tolleranza.

¹²⁶ Operativamente, la mappatura dei materiali e la tessitura muraria sono state ricavate dall'immagine raddrizzata estrapolata dalla nube. Nell'individuare e localizzare i materiali si è dimostrato proficuo l'uso congiunto di immagini a falsi colori e della riflettanza.

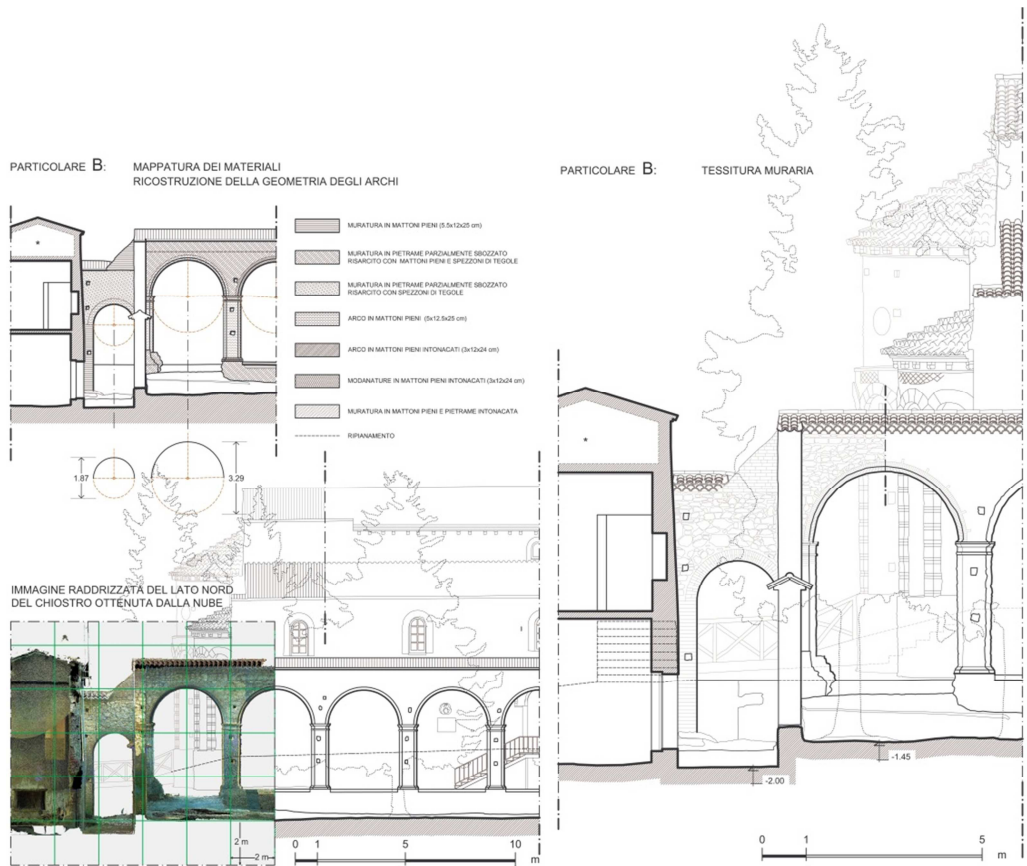


Fig. 4.7 – Complesso architettonico del Patirion (Rossano); Particolare del lato nord del portico del chiostro (2008).

Tra i tanti esempi, che è possibile addurre per illustrare queste potenzialità, riportiamo un *collage* di immagini relative alla Cripta bizantina di Santa Cristina, derivate dal modello poligonale visualizzato, sia a fil di ferro, sia in ombreggiatura sintetica, che mappato con foto ad alta risoluzione (Fig. 4.8).

Attraverso immagini proiettivamente differenti vengono descritti i volumi, l'organizzazione dei spazi, le forme degli elementi della Cripta e i pregevoli affreschi, sia per documentare lo stato di conservazione, sia per la valorizzazione, che per il restauro virtuale di parti delle pitture.

Notiamo come la proiezione ortografica del modello poligonale, visualizzato a fil di ferro, venga usata come surrogato della pianta canonica; ugualmente accade per il prospetto laterale in ombreggiatura sintetica.

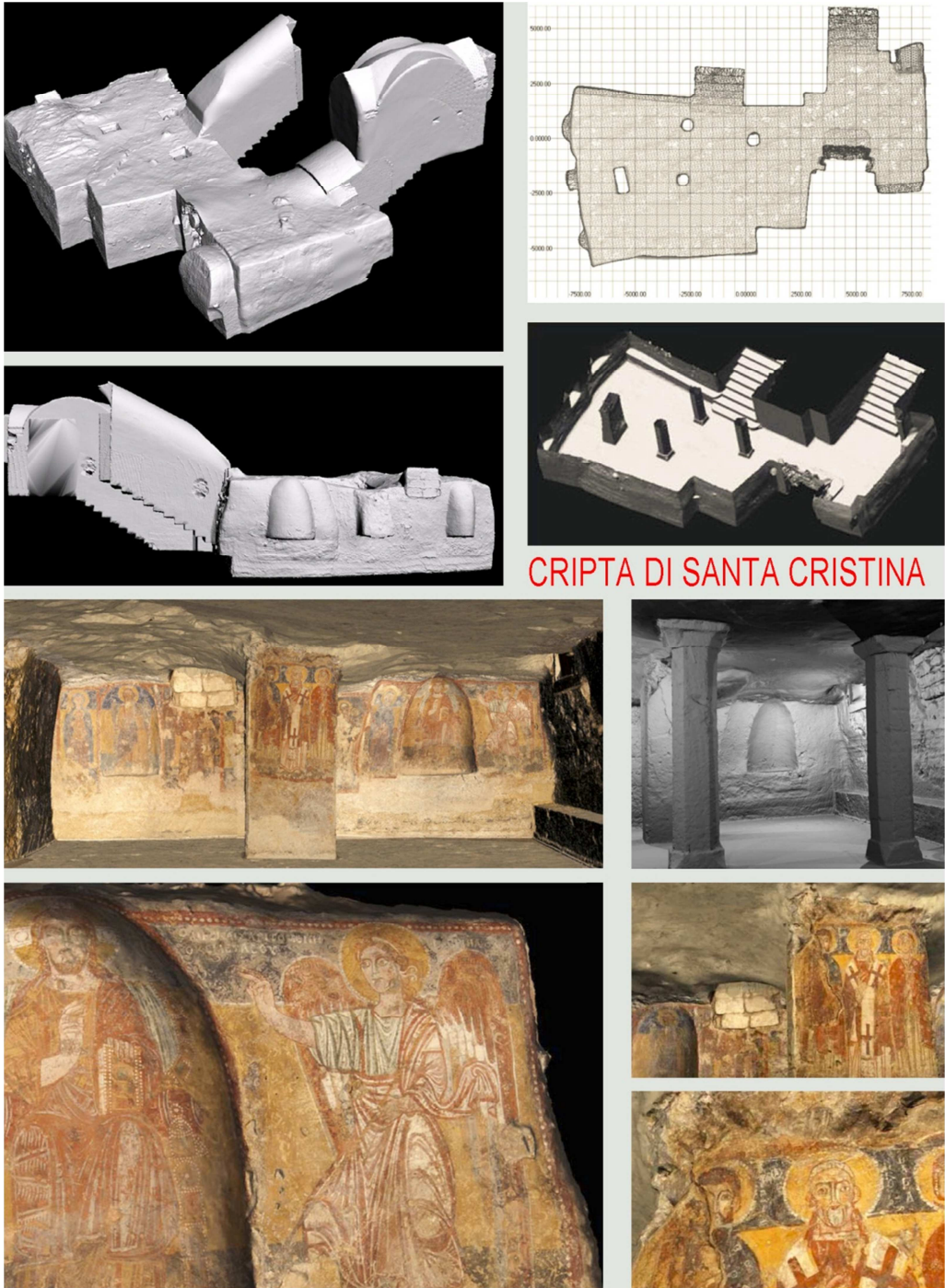


Fig. 4.8 – Cripta di Santa Cristina (Carpignano Salentino, Lecce); collage di immagini (J.-A. BERARDIN et al., 2003).

Prendendo spunto da queste immagini, un'altra considerazione riguarda la minor integrazione degli *snapshot* ottenuti dalla *mesh* con elaborazioni vettoriali (individuazione delle parti sezionate, proiezione delle volte, quotatura, ...), rispetto a quelli derivati dalle nuvole di punti.

In ultimo, sottolineiamo due tendenze, che derivano da questa tipologia di elaborati, ma che presentano caratteri propri di tutte le restituzioni originate dalle tecniche ottiche in questione e, in generale, del disegno informatico¹²⁷:

- la “proliferazione” delle viste (ortografiche, assonometriche e prospettiche), diretta conseguenza della facilità con cui esse vengono prodotte (a patto di avere un modello) spinge, molto spesso, a non distinguere tra queste, quelle maggiormente significative;
- la ricerca della verosimiglianza, sia da punto di vista delle geometrie che dell'aspetto della superficie, sposta l'attenzione verso la definizione di un modello “identico” al reale, trascurando il fattore di scala.

Il primo punto delinea una tendenza non necessariamente negativa, ma che può portare ad esiti grafici poco significativi, o inefficaci, nel momento in cui l'unico metro per la generazione della viste diventa la facilità nell'ottenerle. Si rischia, quindi, di avere delle immagini, “indifferenti” all'obiettivo, cioè non pensate e tarate per dare risposta ad un quesito specifico, o per far emergere i significati di un'architettura; in questo caso, la facilità di elaborazione diventa un fattore che va a detrimento dell'interpretazione, rendendo passivo l'operatore stesso e trasformandolo in “semplice” utilizzatore del mezzo.

Di contro, se la “serialità” delle viste si sviluppa organicamente all'interno di un processo grafico, che sfrutta consapevolmente la molteplicità dei punti di osservazione e le modalità proiettive (per descrivere volumetrie complesse, per verifiche percettive, ...), diviene una prassi aggiuntiva per l'analisi e la restituzione, che affianca figurazioni più complesse, dotate di un'elevata densità significativa.

Uguale discorso vale per il secondo punto, poiché il raffigurare in forma simile al vero è un'opzione propria del disegno, da ricercare ogni volta che incrementa il significato della rappresentazione. Se il suo uso non viene

¹²⁷ Il *trait d'union* tra il disegno informatico e le tecniche ottiche di misura 3D è il modello digitale tridimensionale, che nel caso di queste ultime si declina, sia in termini di nuvola di punti che di modello poligonale, cioè di un archivio digitale caratterizzato dall'accuratezza e dall'oggettività dei suoi dati.

calibrato opportunamente in base agli obiettivi, si rischia che le possibilità della tecnica diventino preponderanti rispetto ai fini prefissati dal rilevatore, fino ad “imporre” la ricerca di una spiccata somiglianza, anche quando sarebbe utile selezionare le informazioni da rappresentare (ad esempio, nella ricerca della geometria, razionalizzazione delle forme, analisi tipologiche e funzionali, ...).

I modelli 3D nella restituzione

Gli esiti figurativi/analitici concretizzati dai “prodotti di immagine” sono uno dei modi in cui si declina la sinergia tra il modello digitale tridimensionale e l’opzione informatica nel disegno di rilievo¹²⁸; difatti, lo spettro d’azione di questa interazione si estende ben oltre questi confini, promuovendo e rendendo usuali indagini prima impensabili, o quantomeno difficilmente attuabili con gli strumenti del rilevamento tradizionale.

Il modello tridimensionale, ottenuto dall’acquisizione, proprio perché stabilisce una corrispondenza “isomorfica” (accuratezza metrica, fotorealismo, ...) con il manufatto, rappresenta un eccezionale intermediario conoscitivo, progettuale e comunicativo tra il rilevatore e l’opera. Ed è per questo suo attributo che la manipolazione del modello assume un carattere paragonabile all’esperienza condotta sull’oggetto stesso e con un ventaglio di opportunità analitiche aggiuntive. Infatti, non si tratta soltanto di una “*trasposizione quantitativa*” che consente di esplorare una replica del manufatto, invertendo il normale rapporto dimensionale/percettivo tra il rilevatore e l’architettura costruita, ma anche di un *incremento di operatività* che attiene la natura stessa della nuvola di punti.

Le due opzioni si concretizzano con un accrescimento dei modi attraverso cui il rilevatore può conoscere l’architettura: la modellazione, la navigazione, l’esplorazione e l’analisi (visualizzazione, proiezione, sezione, *best-fitting*, ...),

¹²⁸ Essi aprono nuovi scenari conoscitivi, non solo proponendo soluzioni figurative – concordi con il mezzo tecnico e nuove dal punto di vista delle tecniche grafiche – alle questioni tradizionalmente indagate con il rilievo architettonico (articolazione dei volumi, aggregazione degli spazi, logiche compositive, verosimiglianza, ...), ma anche “suggerendo” ulteriori *iter* analitico/operativi per indagare il manufatto.

la variazione dei parametri ambientali (inserimento di fonti luminose, ...), ..., sono potenziali stimolatori di strategie da usare nella fase di restituzione di un rilievo.

Diviene possibile afferrare l'architettura con un solo colpo d'occhio, ruotarla, valutarne gli aspetti percettivi e volumetrici attraverso punti di vista inusuali, oppure posti all'infinito, ma anche "violarne" la continuità spaziale con piani di sezione, renderne trasparenti le parti, per cogliere l'aggregazione degli ambienti e l'organizzazione degli elementi architettonici e scomporla in sottosistemi (chiusure e collegamenti orizzontali/verticali, collegamenti orizzontali, ...). Inoltre, ripristinando il rapporto scalare uomo/manufatto, è possibile esplorare lo spazio costruito dentro e fuori, calarsi all'interno di una realtà artificiale per ricavarne sensazioni percettive.

L'esperienza cognitiva, originata dall'interazione con il modello tridimensionale in un ambiente virtuale, può essere tradotta, sia mediante dispositivi grafici formati da *immagini bidimensionali "statiche"* (vedi le immagini proposte nel paragrafo precedente), sia con *rappresentazioni dinamiche*, che incanalano questa esperienza in un flusso di immagini (ad esempio, mediante sequenze animate, visite virtuali lungo percorsi "vincolati"), oppure in ambienti artificiali interattivi.

Relativamente alle rappresentazioni dinamiche, elenchiamo una serie di esiti che, in vario grado, contemperano valenze comunicative/descrittive e istanze analitico/progettuali e sono classificabili per¹²⁹:

- *valenza comunicativa/descrittiva*; le esperienze incluse in questo gruppo, anche se sono caratterizzate dalla compresenza di comunicazione e significazione, hanno un prevalente indirizzo espositivo.

Il primo esempio presentato è il video "*Carpiniana*", che ci consente di visitare la Cripta bizantina di Santa Cristina, attraverso l'animazione del modello tridimensionale della stessa, combinando la visualizzazione *wireframe* (usata a scopo didattico-esplicativo), con l'ombreggiatura sintetica (per evidenziare le forme e i volumi) e con la visualizzazione fotorealistica (per descrivere gli affreschi). La visita (non interattiva) si snoda lungo un percorso "vincolato", che dall'ingresso principale ci porta ad

¹²⁹ Le esperienze che proponiamo sono classificate in funzione della componente che reputiamo essere predominante.

esplorare la cripta e gli affreschi, per uscire dall'ingresso secondario. Oltre a documentare lo stato attuale, l'animazione è principalmente orientata alla promozione e valorizzazione dell'opera, istanza che si manifesta anche nel ripristino virtuale dell'iscrizione in greco del "gruppo di Teofilatto" (riportante la data, la firma del pittore e il committente), che viene tradotta e sovrimpressa alla sequenza filmica.

Il secondo esempio è la visita virtuale della sala del Museo Archeologico Regionale di Palermo, che raccoglie quanto resta delle metope e dei fregi dei templi di Selinunte. Analogamente all'animazione della cripta, anche in questo caso la visita non è interattiva ed è vincolata ad un percorso, che mostra i reperti nella loro collocazione attuale, adoperando differenti visualizzazioni (*wireframe*, ombreggiatura sintetica, fotorealismo), variando l'illuminazione e usando punti di vista insoliti (Fig. 4.9).



Fig. 4.9 – Fotogrammi dal video “Carpiniana” (a sinistra) e dalla visita virtuale sala di Selinunte del Museo Archeologico Regionale di Palermo (a destra) (J.-A. BERARDIN et al., 2002, 2004).

- *istanza analitico/progettuale*; in questo gruppo raccogliamo tutti quei casi in cui i modelli tridimensionali sono utilizzati per simulare ipotesi d'intervento, sia modificando la *texture* associata alla geometria¹³⁰ (riempimento delle lacune, ripristino dei colori originali, omogeneizzazione, ...), sia agendo sul modello geometrico per valutare aggiunte, sottrazioni, ricostruzioni, ..., che ripropongono uno stato precedente del manufatto o ne anticipano uno futuro.

Le applicazioni possono essere finalizzate: all'integrazione di nuove strutture su ruderi esistenti, alla ricostruzione di manufatti scomparsi e al completamento di un'opera non finita, o non realizzata come da progetto

¹³⁰ Questa opzione, seppur in maniera limitata, è stata utilizzata per il ripristino dell'iscrizione del “gruppo di Teofilatto”.

originario (utilizzando foto d'epoca¹³¹, elaborati progettuali, rilievi esistenti, ...), alla riunificazione di resti di manufatti architettonici/archeologici con elementi del suo apparato decorativo attualmente musealizzati, alla realizzazione di modelli tridimensionali a partire dai plastici, alla lettura critica delle fasi evolutive, o della matrice compositiva di un'opera architettonica.

Tra le applicazioni citiamo la simulazione del restauro virtuale della *Sala delle Cariatidi* di Palazzo Reale (ripristino di porzioni di intonaco e dell'apparato decorativo, ricostruzione della balconata distrutta), impiegando un modello geometrico fotorealistico visualizzato *real-time* in ambiente semi-immersivo (Fig. 4.10).



Fig. 4.10 – *Sala delle Cariatidi* di Palazzo Reale (Milano); simulazione di un cantiere di restauro virtuale (F. BREVI et al., 2004).

Un ulteriore esempio è costituito dall'animazione “*The Parthenon*” di Paul Debevec, nella quale viene ricostruito virtualmente il tempio, riposizionando *in situ* i marmi custoditi al British Museum. Nel video viene proposta una simulazione, sia dello stato attuale integrato con i marmi, che un'ipotesi di ricostruzione delle forme e delle cromie originarie, pervenendo ad una rappresentazione dinamica fortemente realistica, in cui le istanze progettuali e le valenze comunicative si mescolano, indirizzando il risultato verso la divulgazione (Fig. 4.11).

Infine, riportiamo l'animazione del modello tridimensionale del plastico ligneo, in scala 1/30 (7,36 x 6,02 x 4,68 m), della Basilica di San Pietro di

¹³¹ La qualità ottenuta dalla fotogrammetria applicata alle foto d'epoca, solitamente, non è adeguata ad un'analisi metrica accurata dell'edificio ricostruito, ma il risultato raggiungibile è comunque utile per ricreare situazioni di somiglianza percettiva.



Fig. 4.11 – *The Parthenon*; ricostruzione virtuale del tempio e riposizionamento dei marmi custoditi al British Museum (P. E. BEBEVEC, 2005).

Antonio da Sangallo il Giovane¹³². Il video illustra i caratteri formali della Basilica non realizzata, ne simula l’illuminazione interna e la percezione delle caratteristiche spaziali¹³³. Inoltre l’inserimento di figure umane nel video, usate come “metro” e termine di paragone per lo spazio e gli elementi architettonici, tende a ripristinare il naturale rapporto fruitore/opera (Fig. 4.12).

Un’ulteriore possibilità dei modelli costruiti con tecniche ottiche 3D, riconosciuta a livello teorico ma non ancora sfruttata appieno, riguarda la scansione *in itinere* delle fasi di uno scavo archeologico e la conseguente modellazione, per rendere virtualmente reversibile un’operazione potenzialmente “distruttiva” (uno scavo, anche se viene condotto corretta-

¹³² La digitalizzazione del modello ligneo, voluta dalla Veneranda Fabbrica di San Pietro, è stata realizzata dal R.A.D.A.A.R. (M. Docci et al., 2006) in occasione della mostra per i cinquecento anni della Basilica. La replica digitale preserva il modello ligneo dall’usura e dai danneggiamenti, che potrebbe subire nel corso dell’eventuale smontaggio, spostamento e rimontaggio in caso di esposizione, oltre ad essere un formidabile strumento per l’analisi del progetto.

¹³³ Michelangelo, riporta il Vasari, definisce la Basilica “cieca di lumi”, giudizio avvalorato anche dalla simulazione: l’interno è scarsamente illuminato dalla luce naturale, con una conseguente difficoltà nella lettura degli spazi e dei partiti decorativi, eccezion fatta per la zona della cupola.

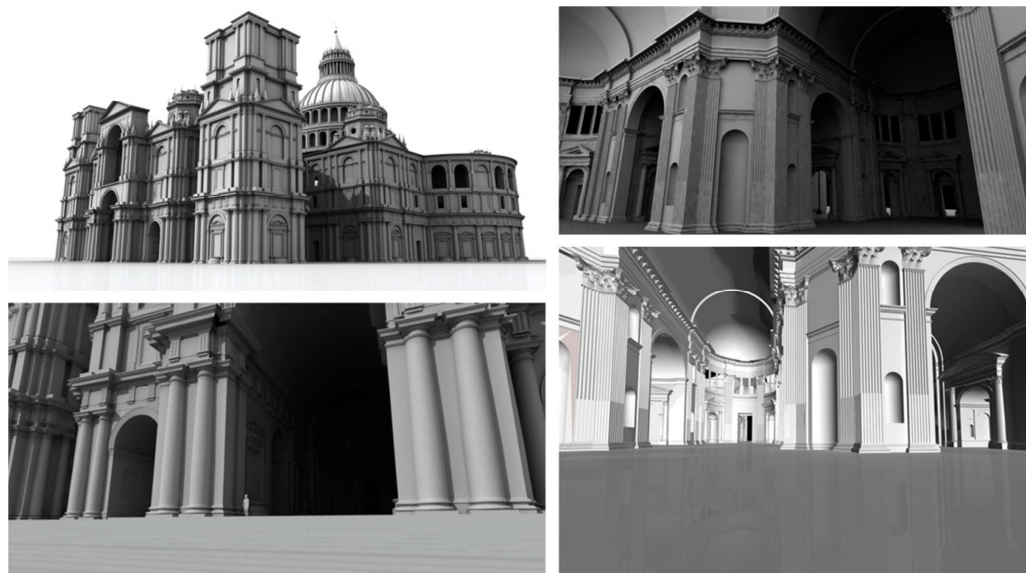


Fig. 4.12 – Animazione del modello tridimensionale del plastico ligneo, della Basilica di San Pietro di Antonio da Sangallo il Giovane (M. DOCCI et al., 2006).

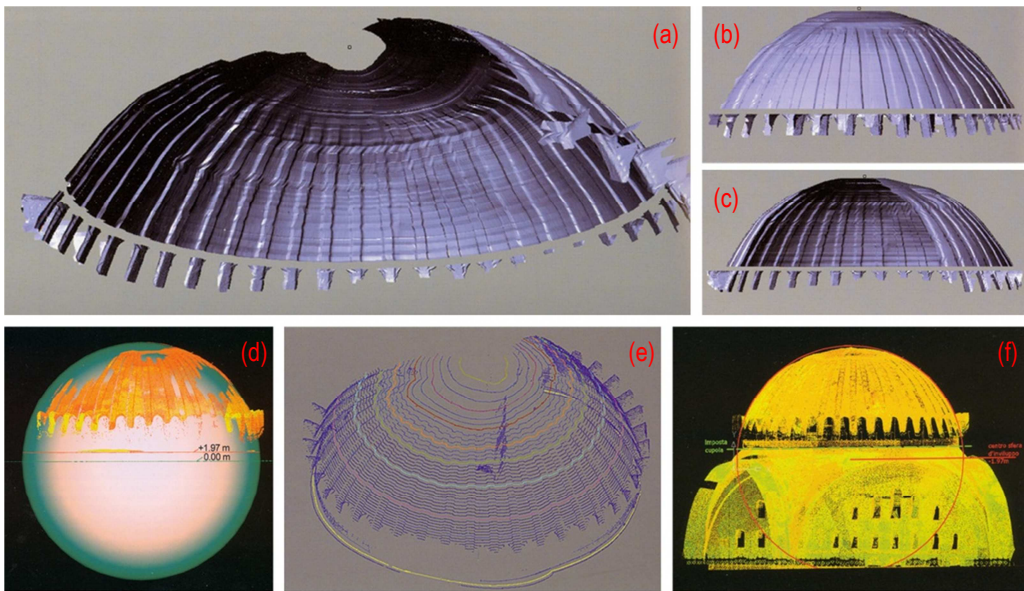
-mente e i dati sono registrati in maniera scrupolosa, comunque “cancella” il contesto archeologico indagato).

In aggiunta alle opportunità d’indagine finora esaminate e indipendentemente dall’esito finale “statico” o “dinamico” e dalle valenze/istanze, il modello generato con tecniche ottiche 3D assume altre connotazioni con precipuo valore analitico/progettuale e orientate:

- alla *simulazione di condizioni di illuminazione* tali da permettere all’osservatore di raccogliere informazioni supplementari dall’oggetto indagato. Opportunità intesa non solo in termini di verifica percettiva, ma anche come condizione operativa per rendere qualitativamente “leggibili” le variazioni locali nella geometria originaria (adattamenti costruttivi, stratificazioni successive, deformazioni dovute a fenomeni di dissesto, ...) ed accentuare le asperità e le incisioni di una superficie (Figg. 4.13a,b,c);
- all’*ingrandimento dei particolari* per “avvicinarsi” all’oggetto tanto da andare oltre la percezione visiva che normalmente si instaura tra manufatto e osservatore, catturando le più minute caratteristiche della superficie (ad esempio nell’analisi dei dipinti o di statue);
- all’*analisi delle geometrie* per definire le forme (utilizzando un elevato

numero di punti posizionati nello spazio) e lo scostamento tra modello numerico (la nuvola di punti), modello geometrico (continuo) e matrice geometrico-formale ideale¹³⁴. Ed ancora, per valutare gli aspetti metrici dei fenomeni di dissesto con rappresentazioni a curve di livello, mappe colorimetriche per definire lo scostamento dalla superficie ideale, *texture* fotorealistiche per descrivere il reticolo fessurativo e così via (Figg. 4.13d,e,f);

- alla *realizzazione di un sistema informativo* basato sul modello tridimensionale dell'oggetto, al fine di avere una struttura integrata di dati e informazioni grafico-testuali. L'integrazione può esser fatta, sia referenziando direttamente le informazioni visive supplementari sulle superfici: lettura degli alzati, mappatura dei fenomeni di dissesto, del degrado e delle informazioni diagnostiche (immagini in luce UV, termografie, ...), ..., che collegando *database* esterni (Figure 4.14 e 4.15);



Figg. 4.13a,b,c,d,e,f – *Cupola di Santa Sofia (Istanbul)*. Viste renderizzate delle superfici NURBS che evidenziano le deformazioni (a, b, c); sfera ideale che approssima la nuvola di punti (d); modello a curve di livello (e); sezione verticale della nuvola di punti lungo i costoloni della cupola che evidenzia le deformazioni rispetto al cerchio ideale (f) (M. DOCCI, 2005).

¹³⁴ Operativamente si procede utilizzando algoritmi di *best-fitting*, che approssimano la nuvola di punti/*mesh* mediante primitive geometriche, per razionalizzare le forme e individuare matrici geometrico-formali ideali.

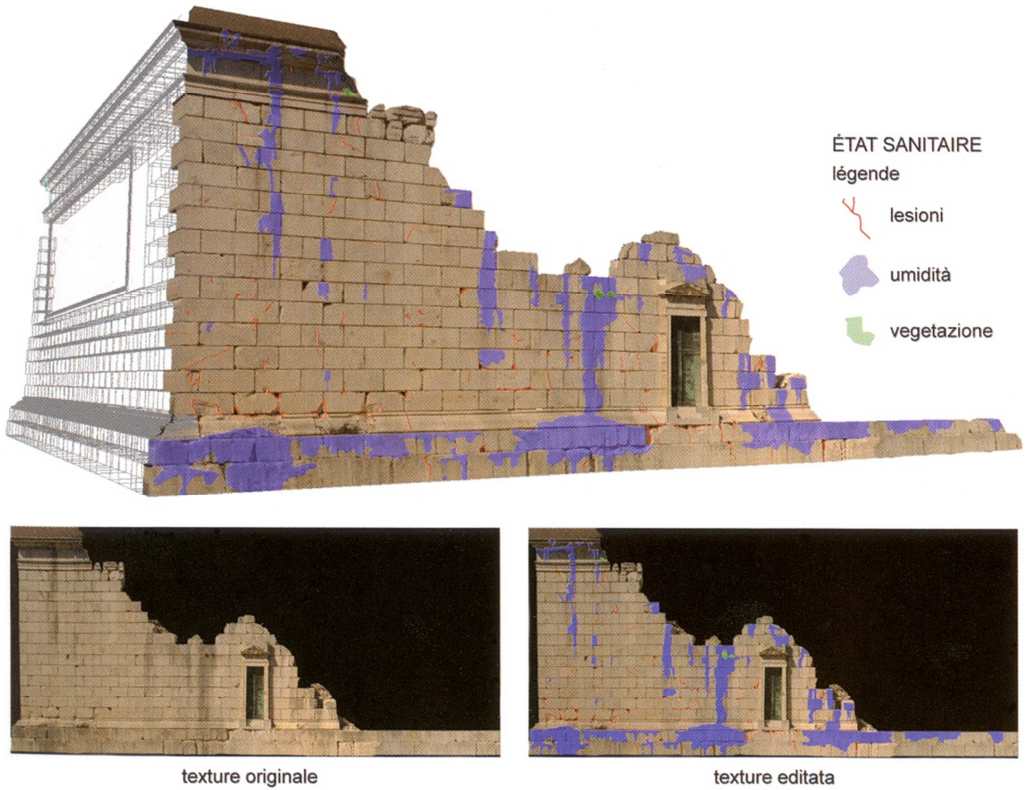


Fig. 4.14 – *Modello tridimensionale fotorealistico costruito tramite fotomodellazione ed integrato con informazioni visive supplementari (mappatura del degrado e rappresentazione del quadro fessurativo)* (L. DE LUCA, 2011).

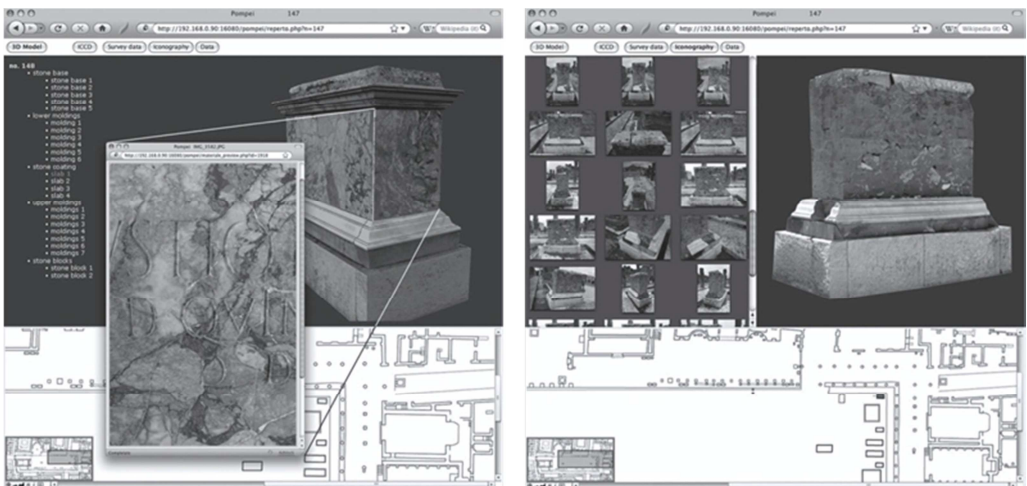


Fig. 4.15 – *Estratti dal 3D GIS di Pompei* (B. BENEDETTI et al., 2010).

In alcuni dei casi illustrati, la verosimiglianza delle forme e dell'apparenza visiva è essenziale per favorire situazioni conoscitive efficaci e pertinenti (ad esempio, le visite virtuali della Cripta di Santa Cristina e della sala di Selinunte, la ricostruzione virtuale del Partenone, la simulazione del restauro della Sala delle Cariatidi); mentre in altri, come ad esempio nello studio della cupola di Santa Sofia – orientato alla definizione della geometria delle forme e delle deformazioni e al confronto modello numerico/matrice ideale –, viene mantenuta una spiccata aderenza alle geometrie reali e trascurato il dato dell'apparenza visiva, proprio perché non essenziale per le indagini in essere.

4.3 Nuove opportunità grafiche per l'analisi: tre casi

Per indagare le trasformazioni indotte dalle tecniche ottiche di misura 3D nell'ambito del rilevamento architettonico e archeologico, nonché per analizzare il ruolo del modello tridimensionale e le sue potenzialità analitico-figurative, abbiamo condotto una serie di sperimentazioni su tre casi studio, che presentano caratteristiche differenti per dimensione, struttura geometrico-architettonica, stato di conservazione, epoca storica e così via. Nello specifico, le tre esperienze riguardano:

– la *Tomba delle Anatre* (Parco di Veio, Roma).

Si tratta di un ambiente di modeste dimensioni scavato nel tufo, le cui forme non sono riconducibili a primitive geometriche, caratterizzato da pitture parietali ed interessato da fenomeni di degrado;

– la *Rotonda di Damous-el-Karita* (Cartagine).

È una struttura in parte ipogea, attualmente allo stato di rudere e quindi con un'elevata incertezza intrinseca legata alle condizioni in cui versa; il manufatto è di dimensioni medie, con un evidente logica compositiva che ne regola le parti;

– la *chiesa di Santa Maria Assunta* (Mesoraca, Crotone).

È un esempio di tardobarocco, con spazi di grandi dimensioni, strutture voltate con dissesto in atto, aree affrescate e un apparato decorativo ricco ed

esteso. Le forme sono riconducibili a primitive geometriche note e si possono ipotizzare, sia le matrici geometriche, che le unità di misura usate nel progetto.

La Tomba delle Anatre (Parco di Veio, Roma)

Descrizione del manufatto

La Tomba, scavata nel tufo ed orientata approssimativamente lungo la direttrice nord-sud, è costituita dal *dromos* e dalla camera a pianta quadrata di circa 3 m di lato, per un'altezza (massima) di 2.36 m. L'intradosso della copertura della camera, originariamente diviso in quattro falde (dipinte, in maniera alternata, in giallo e rosso), è in massima parte crollato, o ricostruito. Lungo la parete sud-est è disposta una banchina scavata nel tufo e limitata da cinque lastre infisse nel pavimento a formare un bordo poco più alto del piano della banchina. Al di sopra di questa, un incasso con andamento altimetrico lievemente inclinato, corre lungo tutta la parete sud-est; mentre su quella nord-est assume la forma di una spezzata a V capovolta.

La Tomba, datata intorno al 680 a.C. circa, è completamente dipinta. Oltre a quel che rimane delle falde dell'intradosso, una fascia composta da cinque strisce alternate di colore nero, giallo e rosso (N-G-N-R-N), divide la parte inferiore da quella superiore, rispettivamente dipinte in rosso e in giallo. Sulla parete sud-est, in corrispondenza della banchina, la fascia si semplifica, riducendosi a tre strisce (N-G-N). Inoltre sulla parete nord-est sono raffigurati cinque uccelli acquatici (Figg. 4.16a,b).



Figg. 4.16a,b – Tomba delle Anatre; foto del dromos e della camera.

Metodo, strumenti e software

Per la campagna di acquisizione della Tomba delle Anatre abbiamo usato un *laser scanner* TOF ad impulsi HDS 3000 della Leica Geosystems; mediante 4 *scanworld* abbiamo acquisito la camera e il *dromos* con una griglia di campionamento dal passo teorico di 0,5x0,5 cm, mentre l'immediato intorno con una griglia di 1x1 cm.

Per la registrazione delle nuvole di punti abbiamo usato due differenti approcci e poi confrontato i risultati. Nel primo, l'allineamento è guidato da *target* piani ad elevata riflettanza, distribuiti efficacemente nella scena e battuti dalla stazione totale Leica TCR 407p da un unico posizionamento, al fine di definire un sistema di riferimento unico per tutte le scansioni. Per la modesta dimensione dell'area interessata dal rilevamento e grazie alla particolare disposizione dei *target*, non abbiamo utilizzato una poligonale d'appoggio, ma è bastato un solo posizionamento della stazione totale. Il *software* utilizzato è il Cyclone 5.2 della Leica, con il quale si è raggiunto un errore di allineamento massimo, sui *target*, pari a 3 mm.

Nel secondo approccio abbiamo filtrato e registrato le riprese della sola camera, eseguendo un allineamento preliminare manuale mediante punti comuni a due scansioni adiacenti e, successivamente, un allineamento globale automatico di tutte le scansioni per minimizzare l'errore residuo; per questa seconda procedura si è adoperato il *software* Geomagic Studio 10.

In entrambi i casi, abbiamo verificato la qualità metrica dei due allineamenti¹³⁵, confrontando la posizione di una serie di punti significativi presi, sia sulla nuvola di punti che *in situ*. Lo scostamento massimo registrato risulta essere di circa 5 mm.

Sempre con Geomagic Studio 10, abbiamo costruito due modelli poligonali della Tomba:

- un modello dell'intera Tomba con risoluzione di 1 cm per la camera, il *dromos* e l'intorno (1,75 milioni di triangoli circa), ottenuto registrando le riprese con Cyclone 5.2 e ricavando la *mesh* con Geomagic Studio 10;
- un modello della sola camera con risoluzione di 0,5 cm (1,92 milioni di triangoli circa), per realizzare il quale abbiamo usato Geomagic Studio 10,

¹³⁵ I due approcci hanno dato esiti sostanzialmente simili e non abbiamo registrato differenze significative dei risultati ottenuti.

sia nella fase di allineamento che di *meshing*.

Infine, per migliorare la qualità della *mesh*, abbiamo sottoposto entrambi i modelli ad una procedura di *editing*, necessaria per chiudere le lacune e correggere gli errori topologici.

Riflessioni e risultati raggiunti

Partendo dalla nuvola di punti non strutturata, abbiamo generato una *mesh* in grado di descrivere, in modo accurato, le superfici della Tomba e, da questa, abbiamo dedotto le curve di livello e gli elaborati canonici bidimensionali (piante e prospetti-sezioni)¹³⁶. Inoltre, sfruttando le modalità grafiche proprie della nuova tecnologia e “manipolando” il modello 3D (sia sotto forma di nuvola di punti che di *mesh*), abbiamo sondato la possibilità di ottenere dispositivi grafici finalizzati alla definizione di un determinato aspetto: una prima trascrizione sintetica della morfologia della Tomba, che assume valore di contesto formativo del suo modello mentale.

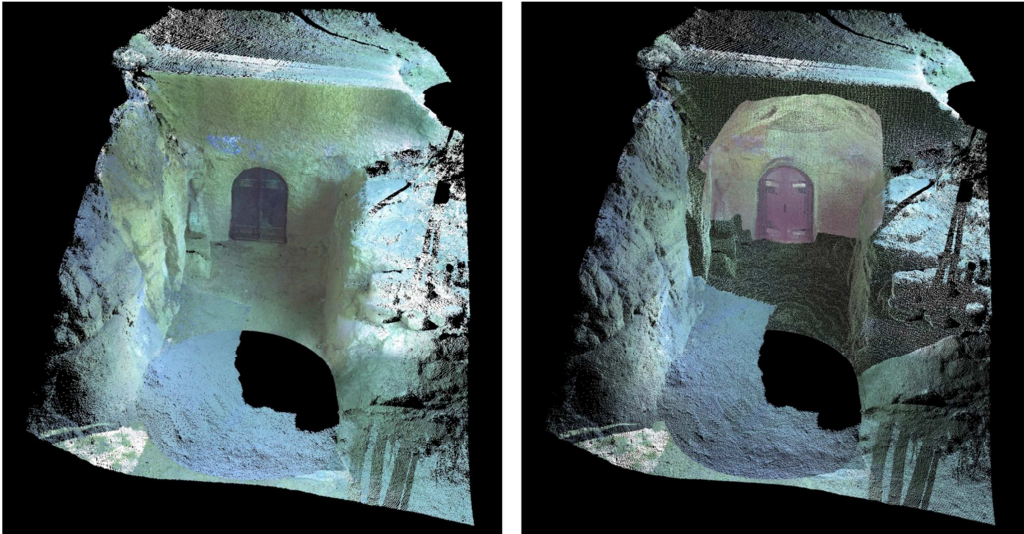
Questa “parzializzazione” del tema d’indagine individua una specifica problematica che dà luogo ad una serie di immagini specializzate. Alcune di queste sono dedotte dalla nuvola di punti, senza nessuna ulteriore elaborazione (Figg. 4.17a,b), altre sono arricchite con segni grafici (Fig. 4.18), mentre un’ulteriore immagine è ricavata dalla *mesh* e, successivamente, trattata in ambiente CAD (Fig. 4.19).

Tutte queste immagini sono caratterizzate dalla compresenza di “elementi” utili per la significazione e la comunicazione, ma hanno un orientamento prevalentemente espositivo, volto a trasferire conoscenze già acquisite. Nel realizzare queste immagini, si è potuto registrare un risparmio di tempo rispetto a quello occorso per tracciamento degli elaborati canonici di cui sopra.

Le due viste prospettiche a quadro inclinato (Figg. 4.17a,b), sono il risultato dell’elaborazione della nuvola di punti con l’intento di mettere in evidenza le relazioni (spaziali e dimensionali) tra la cella e il *dromos*. La prima delle due, propone una veduta dell’esterno della Tomba, mentre la seconda è trattata per far risaltare la cella, riducendo a sfondo l’intorno. La lettura congiunta e

¹³⁶ La Tomba, pur essendo una delle più antiche con dipinti del Mediterraneo, non era mai stata accuratamente rilevata; infatti, gli elaborati canonici (piante e sezioni) degli attuali due rilievi in possesso della Soprintendenza, rispettivamente del 1962 e del 1982, ne descrivono la morfologia in maniera sommaria e poco aderente alla realtà. In questo scritto, riportiamo soltanto alcuni dei disegni al tratto prodotti.

sequenziale dei due *snapshot* favorisce la costruzione di un modello mentale qualitativo, fatto di interrelazioni tra i due spazi funzionali (forma, dimensione e posizione reciproca), innescando nuove possibilità sia interpretative che comunicative.



Figg. 4.17a,b – Tomba delle Anatre; viste prospettiche a quadro inclinato dedotte dalla nuvola di punti.

In figura 4.18 è riportato lo *snapshot* raddrizzato del prospetto-sezione frontale della Tomba, dedotto dalla nuvola di punti; su questo è indicata la sezione fatta sul *dromos*, con la sovrapposizione del profilo mediano della camera (rispettivamente tracciate, in rosso, con linea continua marcata e campitura dello stesso colore ed in nero con linea tratteggiata). Associando la camera al *dromos*, mediante un grafico bidimensionale, si esplicita una prima lettura quantitativa del sistema interno/esterno della Tomba stessa¹³⁷.

Il processo seguito è stato quello di definire prima le forma e le relazioni spaziali fra i due ambienti in maniera qualitativa, usando una scala di sintesi per “costruire” la lettura dell’insieme (Figg. 4.17a,b); quindi di arricchire il modello mentale con elaborati caratterizzati metricamente.

¹³⁷ Se le figure 4.17a,b concorrono alla genesi qualitativa dello schema mentale della forma e della dimensione della cella, nonché del *dromos* e delle loro relazioni reciproche, quest’ultima figura ne precisa le caratteristiche morfologiche, fornendone una descrizione metrica (vedi le quote, l’indicazione della scala grafica e, soprattutto, l’uso delle proiezioni ortogonali come metodo proiettivo).

Il processo, in definitiva, è quello di un “avvicinamento” progressivo alla comprensione della Tomba; nell’economia di questa azione conoscitiva, è opportuno che la lettura dei disegni bidimensionali, avvenga a valle dei dispositivi necessari per iniziare l’*iter* “dinamico” di costruzione del personale schema tridimensionale del manufatto.

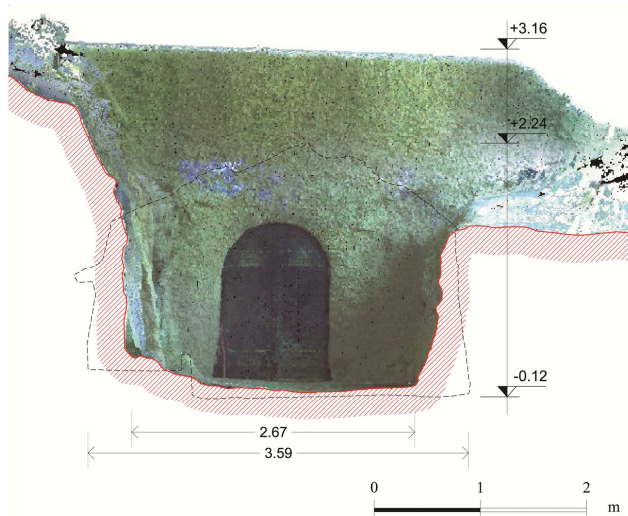


Fig. 4.18 – Tomba delle Anatre; prospetto-sezione frontale.

Naturalmente, la costruzione di un contesto grafico per definire il modello mentale del manufatto, può impiegare figure più “raffinate” dal punto di vista delle tecniche grafiche (ad esempio, gli elaborati tradizionali o quelli ricavati dalla *mesh*), ma l’elemento caratterizzante, che accomuna questa tipologia di immagini, è da ricercare nella possibilità di raggiungere – in maniera analoga – l’obiettivo prefissato, con un limitato dispendio di tempi e mezzi.

L’ultima delle immagini (Fig. 4.19), a differenza dei grafici precedenti, ha come base di partenza il modello poligonale, elaborato con lo stesso *software* con cui si è generata la *mesh*, integrato con la pianta al tratto. Una procedura con tempi di elaborazione più elevati, rispetto a quelli delle figure descritte precedentemente, ma più brevi se rapportati ai tempi per realizzare un analogo dispositivo grafico composto da soli disegni tradizionali.

Entrando nel merito della restituzione, questa individua nella sezione verticale la cifra significativa della Tomba e la registra con una sezione

prospettica, completata con riferimenti metrici ed arricchita con la pianta. L'esito figurativo è un dispositivo grafico che concretizza un contesto, in cui agiscono contemporaneamente più elaborati, che innescano meccanismi di rimando dall'uno all'altro.

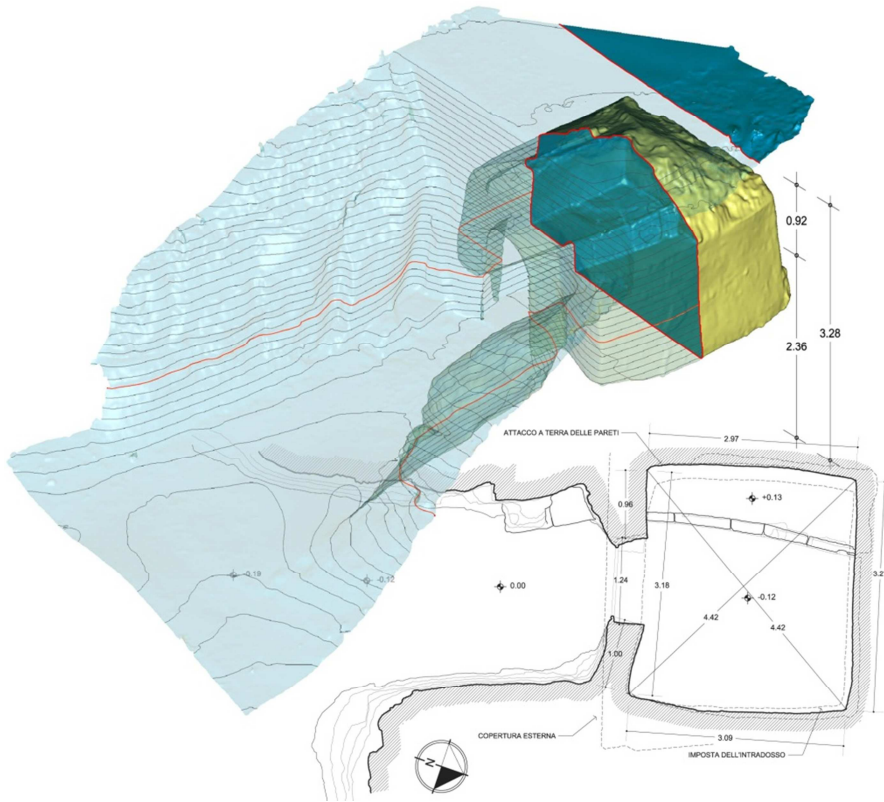


Fig. 4.19 – Tomba delle Anatre; sezione prospettica e pianta.

SEZIONE TRASVERSALE A-A' SCALA 1:50

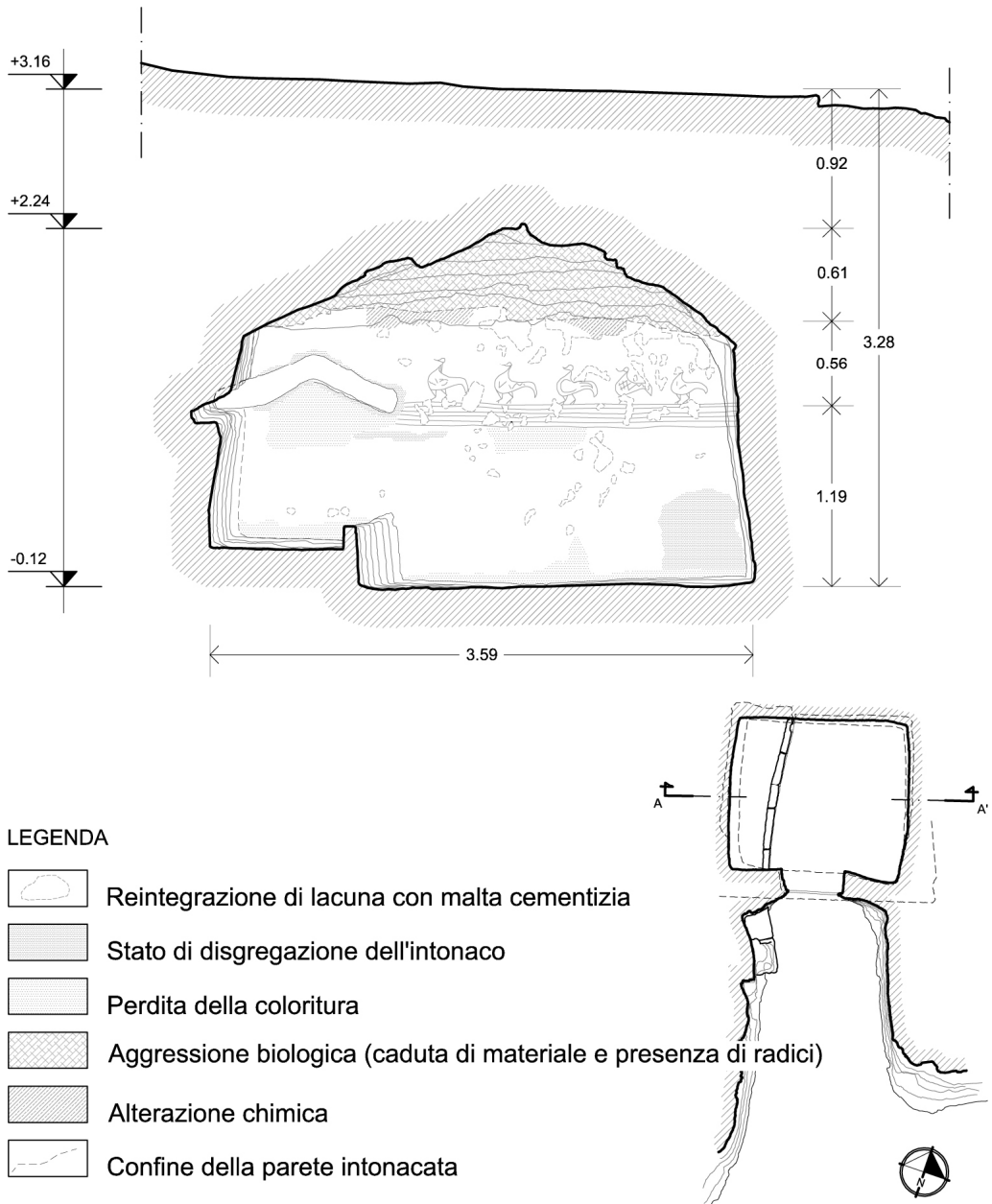


Fig. 4.20 – Tomba delle Anatre; sezione trasversale A-A'.

La Rotonda di Damous-el-Karita (Cartagine)

Descrizione del manufatto

La struttura ipogea, scoperta da padre Alfred-Louis Delattre nel 1912, aveva probabilmente funzione di *martyrion*, meta di un intenso pellegrinaggio. La memoria, secondo l'archeologo austriaco Heimo Dolenz, viene costruita non prima del secondo terzo del VI secolo, cioè dopo la riconquista bizantina del Nord Africa; mentre il piano fuori-terra viene rifatto e allargato, con l'aggiunta di un ambulatorio, tra la fine del VI e l'inizio del VII secolo d.C. (Fig. 4.21)

La struttura si componeva di uno spazio semicircolare porticato e dalla Rotonda. L'emiciclo, che Dolenz chiama Sigma, serviva da area di raccolta e sosta per i pellegrini; mentre la Rotonda era, molto probabilmente, formata da una cripta, in cui erano custodite le reliquie e da una struttura fuori-terra, con funzione di oratorio. L'accesso, dal Sigma alla cripta, avveniva attraverso due rampe di scale separate (una per l'ingresso e l'altra per l'uscita), ornate con pavimenti musivi e voltate a botte¹³⁸.

La cripta, di forma circolare e coperta con una cupola, è scandita da una teoria di 14 nicchie, intervallate originariamente da 16 colonne con capitelli zoomorfi. Le nicchie, l'ingresso e l'uscita (questi ultimi due posti in posizione diametralmente opposta), insieme alle colonne, determinano uno schema geometrico basato sulla divisione in 32 parti della circonferenza, con i 16 cavi nel muro (le nicchie e i passaggi) intercalati da altrettante colonne.

Al centro della cripta, un ciborio in marmo giallo della Numidia, conteneva e proteggeva il reliquiario¹³⁹; mentre una cupola, forse dotata di *opàion* e ricoperta di tessere dorate, copriva un ambiente con pavimento mosaicato.

L'illuminazione era assicurata da tre pozzi luce inclinati (aperti nelle nicchie 4, 5 e 6), dalle scale e dall'ipotetico *opàion*. Uno solo dei pozzi luce è rimasto pressoché intatto, mentre gli altri due sono stati accorciati e murati¹⁴⁰. 4.21).

¹³⁸ La "specializzazione" delle rampe, una per la discesa (nord-est) e l'altra per la salita (sud-ovest) viene ipotizzata da padre Delattre, in base ai disegni del pavimento musivo delle scale. La regolazione della circolazione pedonale fa pensare ad un costante e consistente flusso di pellegrini, a testimonianza dell'importanza delle reliquie custodite.

¹³⁹ Attualmente, rimane un basamento circolare in pietra, su cui era poggiato il ciborio.

¹⁴⁰ Inoltre, in occasione del Congresso eucaristico internazionale celebrato a Cartagine nel 1930, la basilica di Damous-el-Karita, la *basilica Maiorum* e quella detta di "Santa Monica", sono state "restaurate". In particolare, a Damous sono stati ricostruiti i muri della basilica, con

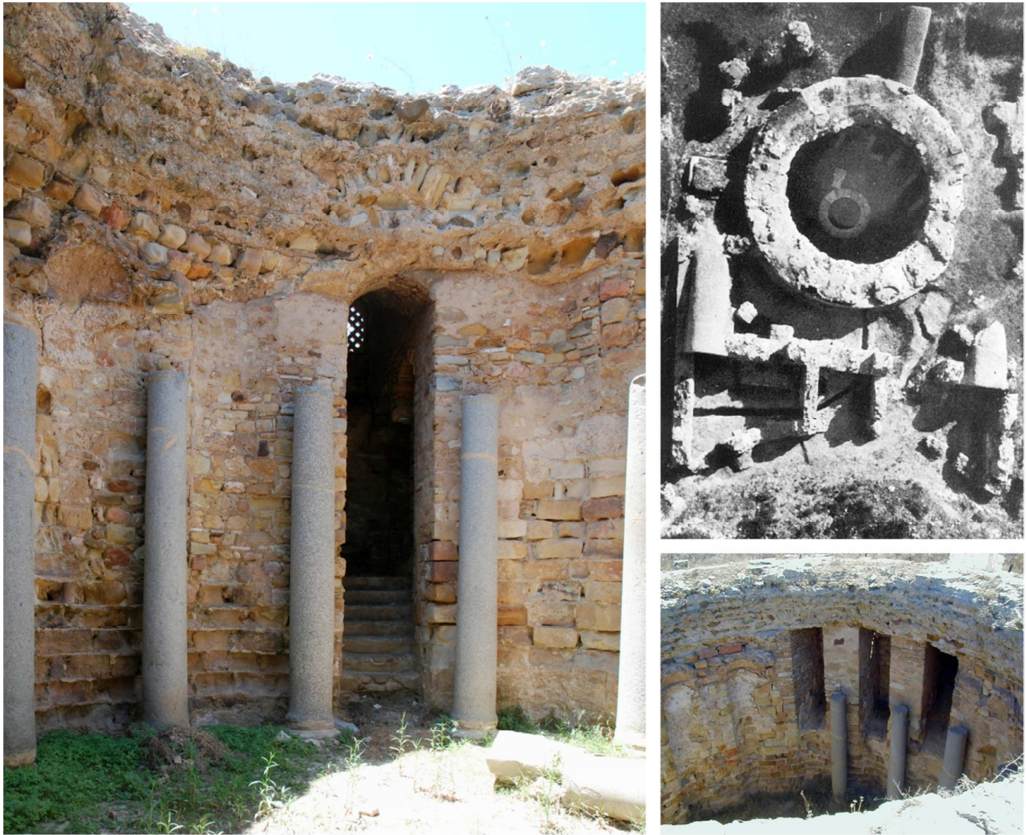


Fig. 4.21 – Rotonda di Damous-el-Karita; foto aerea e viste dell'interno della Rotonda.

Metodo, strumenti e software

Per l'acquisizione della Rotonda e del suo immediato intorno, abbiamo usato un *laser scanner* TOF ad impulsi (Leica HDS 3000), campionando l'interno della cripta con un passo teorico di 2x2 cm (arrivando fino a 1x1 cm nella scansione di alcune parti), mentre per i muri fuori-terra e per il terreno circostante abbiamo usato una griglia (sempre teorica) di 2x2 cm.

Per la registrazione degli *scanworld* (in tutto 7, per un totale di 4.200.000 di

materiali trovati sul posto, fino ad un'altezza di 1,5 m e rimontate le colonne di separazione tra le navate. Nella Rotonda sono state rifatte, in parte, le scalinate d'accesso e la loro copertura; sono state ripristinate le colonne e alcune porzioni di muratura della cripta; nonché inserite delle barre d'acciaio per consolidare la struttura. Per maggiori ragguagli sui rifacimenti della Rotonda, si rimanda a H. DOLENZ, *Damous-el-Karita: Die österreichisch-tunesischen Ausgrabungen der Jahre 1996 und 1997 im Saalbau und der Memoria des Pilgerheiligtumes Damous-el-Karita in Karthago*, Wien Österreichisches Archäologisches Institut, 2001.

punti) abbiamo utilizzato, sia i *target* piani ad elevata riflettanza (identificati, in maniera semiautomatica, dal *software* Cyclone 5.2), battuti da una poligonale d'appoggio realizzata con una stazione totale Leica TCR 407p, che i punti comuni a scansioni adiacenti. L'errore di allineamento massimo ottenuto è pari ad 1 cm circa.

La successiva fase di *meshing* e *editing* (condotta con Geomagic Studio 10) ha dato luogo ad un modello poligonale della cripta e delle rampe con risoluzione geometrica di 2 cm (3,3 milioni di triangoli circa), da cui abbiamo estratto, in maniera automatica, i profili e gli altri elementi, necessari per disegnare gli elaborati bidimensionali¹⁴¹ (Fig. 4.22).

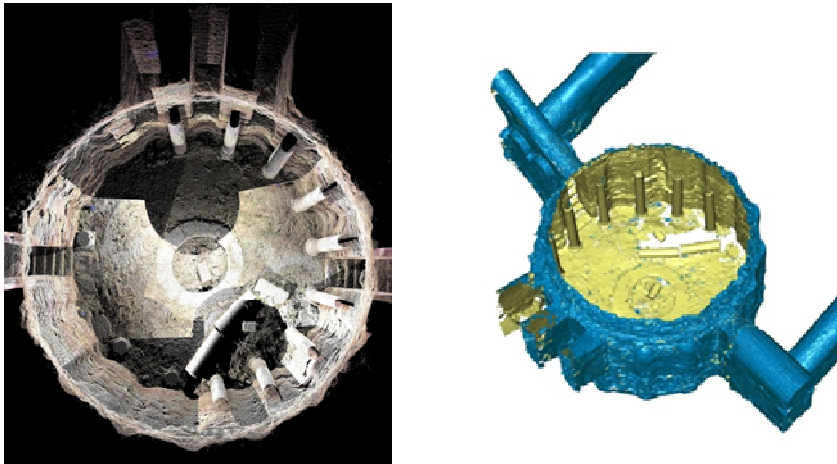


Fig. 4.22 – Rotonda di Damous-el-Karita; viste prospettiche dedotte dalla nuvola di punti e dalla mesh.

Riflessioni e risultati raggiunti

Con il rilevamento abbiamo *definito* la forma architettonica al fine di *indagarne* la matrice geometrica e la *ratio* (funzionale, compositiva, costruttiva, ...) che dà luogo alla “fisionomia” del manufatto;

la forma, dunque, come *trait d'union* degli elementi e dei significati di un'architettura e il modello tridimensionale come “mezzo” da cui estrarre le informazioni. La proficuità dell'azione di rilievo è subordinata, come detto, all'instaurarsi di un continuo dialogo tra due polarità: il modello

¹⁴¹ Nell'importare le nuvole in Geomagic (già allineate in Cyclone 5.2) abbiamo eliminato manualmente i dati “estranei” al manufatto ed effettuato un allineamento globale per redistribuire l'errore residuo.

tridimensionale e le fonti bibliografiche, documentarie e iconografiche¹⁴².

Per interpolare i dati del *laser scanner* e, quindi, per “ricostruire” l’idea di progetto della Rotonda, si è scelto il cilindro¹⁴³, come superficie “filologicamente corretta”; mentre, ad un elaborato bidimensionale, la pianta, è affidato il compito di riassumerne le qualità formali¹⁴⁴.

Il calcolo del cilindro di *best-fitting*, cioè la migliore approssimazione ai minimi quadrati della nuvola di punti, si basa sull’algoritmo automatico implementato dal *software* scelto (nel nostro caso Geomagic Studio 10); mentre la pianta, “tradizionale” nell’aspetto, è stata ricavata con procedure semiautomatiche dalla *mesh*, conseguendo un notevole risparmio di tempi nell’elaborazione.

Dal rilievo risulta che la superficie cilindrica è definita da una circonferenza ideale di raggio pari a 4.58 m e sagomata da 14 nicchie circolari, aventi il centro approssimativamente su una seconda circonferenza, concentrica alla prima, di raggio pari a 4.27 m¹⁴⁵; su quest’ultima sono disposte anche le colonne. Lo schema regolatore della pianta deriva dalla divisione della circonferenza in 32 parti. Una possibile modalità di suddivisione consiste nell’inscrivere un quadrato e dividere ciascun lato in due parti uguali. In tal modo è possibile tracciare le bisettrici dei 4 angoli retti e individuare il punto mediano dell’arco che sottende il lato corrispondente. La circonferenza viene divisa in 8 parti di uguale lunghezza e, collegando tutti i vertici, si traccia un ottagono regolare. Iterando il procedimento si possono costruire i poligoni

¹⁴² Sotto queste premesse, si è esaminato quanto prodotto dagli archeologi, al fine di raccogliere notizie di natura storico-critica (studi interpretativi, testimonianze scritte, foto d’epoca e dello stato attuale, rilievi, ...), che plasmano, in un quadro complessivo, le caratteristiche salienti del monumento e le “tappe evolutive” del suo percorso edilizio.

¹⁴³ Il calcolo del cilindro di *best-fitting*, cioè la migliore approssimazione ai minimi quadrati della nuvola di punti con questa primitiva, si basa su automatismi controllati dall’algoritmo implementato dal *software* usato (nel nostro caso Geomagic Studio 10).

¹⁴⁴ In merito alla costruzione di un modello continuo (*mesh*, NURBS, curve di livello, elaborati tradizionali, ...) a partire dalla nuvola di punti, si pone l’ulteriore questione del passaggio dal “discreto” al “continuo”. Tale passaggio, nella fase di definizione del modello *master*, deve essere governato mediante criteri di qualità metrica (cioè definendo, in funzione dell’obiettivo, il livello di approssimazione del modello geometrico ai dati di partenza); mentre, nella fase in cui si definisce la matrice compositiva ideale è necessario far intervenire istanze “filologiche”, per descrivere le forme tramite le primitive geometriche conosciute e usate dall’artefice dell’opera, o correntemente adoperate nel periodo storico-culturale a cui risale quest’ultima. Quindi non è solo un risalire alla forma originaria, modificata in fase di costruzione e da successivi interventi e stratificazioni storiche, ma è la scelta ragionata, tra tutte le possibili soluzioni, di quella più plausibile.

¹⁴⁵ I due bracci d’accesso alla Rotonda sono inclinati di 3.80° e 1.90° rispetto al diametro verticale della circonferenza ideale

regolari di 16 e 32 lati. I vertici di quest'ultimo, individuano la posizione delle nicchie e delle colonne (Fig. 4.23).

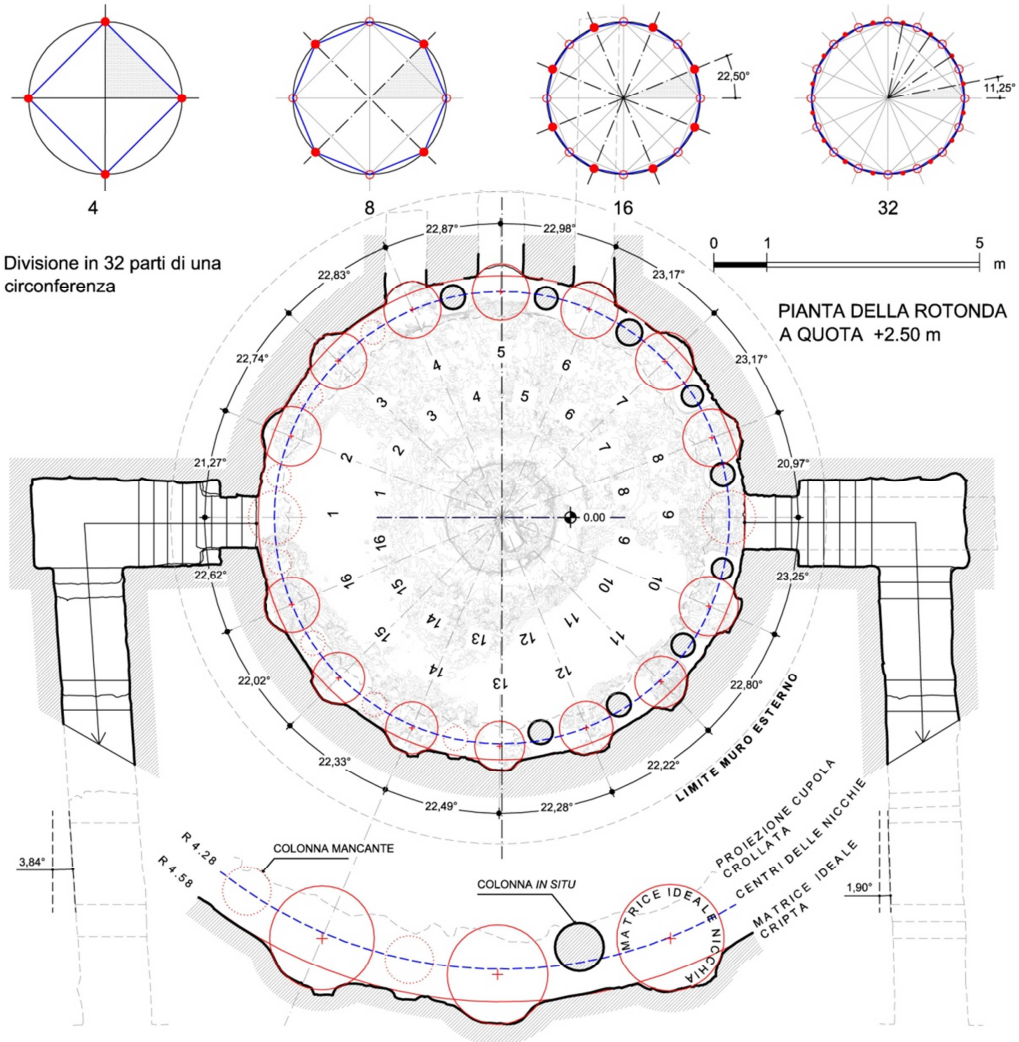


Fig. 4.23 – Rotonda di Damos-el-Karita; ipotesi di schema regolatore della pianta.

*La chiesa di Santa Maria Assunta (Mesoraca, Crotone).**Descrizione del manufatto*

I lavori per la costruzione della chiesa di Santa Maria Assunta ebbero inizio nel 1761 e terminarono nel 1772. La chiesa è organizzata secondo uno schema a croce latina ad unica navata (21.5 m x 9.5 m circa), “dilatata” da tre cappelle per lato, arricchite con altrettanti altari marmorei. L’invaso della navata è coperto da una volta a botte, in parte affrescata; mentre, all’incrocio tra la navata e il transetto si imposta la cupola emisferica completamente affrescata. I due bracci poco profondi del transetto, trasformati in due cappelle, sono impreziositi da altari marmorei e coperti con volte a botte affrescate. Il sontuoso altare maggiore, anch’esso realizzato in marmo policromo è collocato tra il presbiterio e l’abside. Dal braccio destro del transetto si accede alla sacrestia, disposta parallelamente all’aula e alla cripta, dove è sepolto il fondatore della chiesa (Padre Matteo Lamanna); dal braccio sinistro, al campanile.

La facciata è scandita verticalmente da quattro lesene e suddivisa, orizzontalmente, in due parti da un cornicione. Il fastigio di coronamento è formato da un’edicola con la statua dell’Assunta, affiancata dalle statue dei Santi Pietro e Paolo e da due cuspidi poste alle estremità. La finitura in pietra della facciata è opera del maestro muratore Andrea Pignanelli, come attesta l’epigrafe posta sopra il portale, alla cui costruzione attese tra il 1799 ed il 1801 (Fig. 4.24).



Fig. 4.24 – Chiesa di Santa Maria Assunta; foto dell’esterno e della volta a botte della navata.

Metodo, strumenti e software

Per rilevare il complesso architettonico (chiesa, cripta, ambienti contermini e immediato intorno) abbiamo usato prevalentemente il *laser scanner* TOF ad impulsi (Leica HDS 3000) integrato, con metodi e strumenti tradizionali (stazione totale Leica TCR 407p, metodo diretto, fotoraddrizzamento)¹⁴⁶. L'interno e l'esterno della chiesa sono stati campionati con un passo teorico di 1x1 cm, arrivando fino a 0,5x0,5 cm nella scansione dei particolari; mentre il terreno circostante è stato ripreso con una "maglia" teorica di 5x5 cm¹⁴⁷. Nell'allineamento dei singoli *scanworld* abbiamo usato, sia i *target* piani ad elevata riflettanza, battuti da una poligonale d'appoggio chiusa (realizzata con la stazione totale Leica TCR 407p), che i punti comuni alle scansioni adiacenti. La procedura di allineamento condotta con Cyclone 5.2 della Leica, ha dato origine ad un errore di allineamento massimo di 2 cm circa.

Dalla nuvola di punti allineata, tramite l'applicativo Leica Cloudworks per Autocad, abbiamo realizzato gli elaborati tradizionali (piante, prospetti, sezioni e configurazione planimetrica generale).

Per la sola parte relativa all'intradosso della volta a botte della navata abbiamo registrato le nuvole di punti (allineamento preliminare manuale e allineamento globale automatico)¹⁴⁸ e quindi generato la *mesh* con risoluzione geometrica di 2 cm, utilizzando Geomagic Studio 10. Con lo stesso *software* abbiamo gestito l'*editing* e l'applicazione di foto ad alta risoluzione (Fig 4.25).

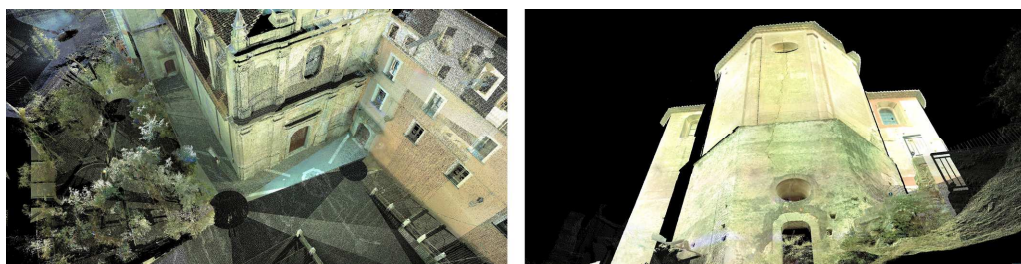


Fig. 4.25 – Chiesa di Santa Maria Assunta; viste prospettiche dedotte dalla nuvola di punti (facciata e abside).

¹⁴⁶ Il rilevamento strumentale, integrato parzialmente con il metodo diretto, ha interessato: gli altari, alcuni particolari decorativi, l'interno del campanile e il corridoio di collegamento tra il campanile, l'esterno e il braccio sinistro del transetto.

¹⁴⁷ Per un totale di 26 *scanworld* ed una nuvola di circa 306 milioni di punti.

¹⁴⁸ Questa seconda procedura ha portato ad una diminuzione dell'errore di allineamento, fino ad ottenere il valore massimo di 5 mm.

Riflessioni e risultati raggiunti

Il rilevamento si propone, oltre la preliminare ricognizione delle fonti bibliografiche e d'archivio, di realizzare una documentazione grafica metricamente accurata, per descrivere le forme indagate e la geometria delle deformazioni. Pertanto, dalla nuvola di punti abbiamo estratto i profili necessari per tracciare gli elaborati canonici bidimensionali (piante, prospetti e sezioni) e, su questa base, avanzare delle ipotesi relative alle unità di misura usate. In questo caso, a differenza della procedura semiautomatica sperimentata nella restituzione della pianta della Rotonda (generazione della *mesh* e successiva estrazione degli elementi per disegnarla), registriamo un notevole aggravio dei tempi di elaborazione (Figg. 4.26a,b).

Parallelamente a questo percorso, abbiamo deciso di elaborare la *mesh* dell'intradosso della volta a botte della navata per ottenere delle immagini, pertinenti alla tecnologia usata (viste dedotte dalla *mesh*, curve di livello, mappa degli scostamenti tra la *mesh* ed il cilindro ideale di *best-fitting*), capaci di descrivere le forme e le deformazioni con un elevato livello di qualità metrica (Fig. 4.27).

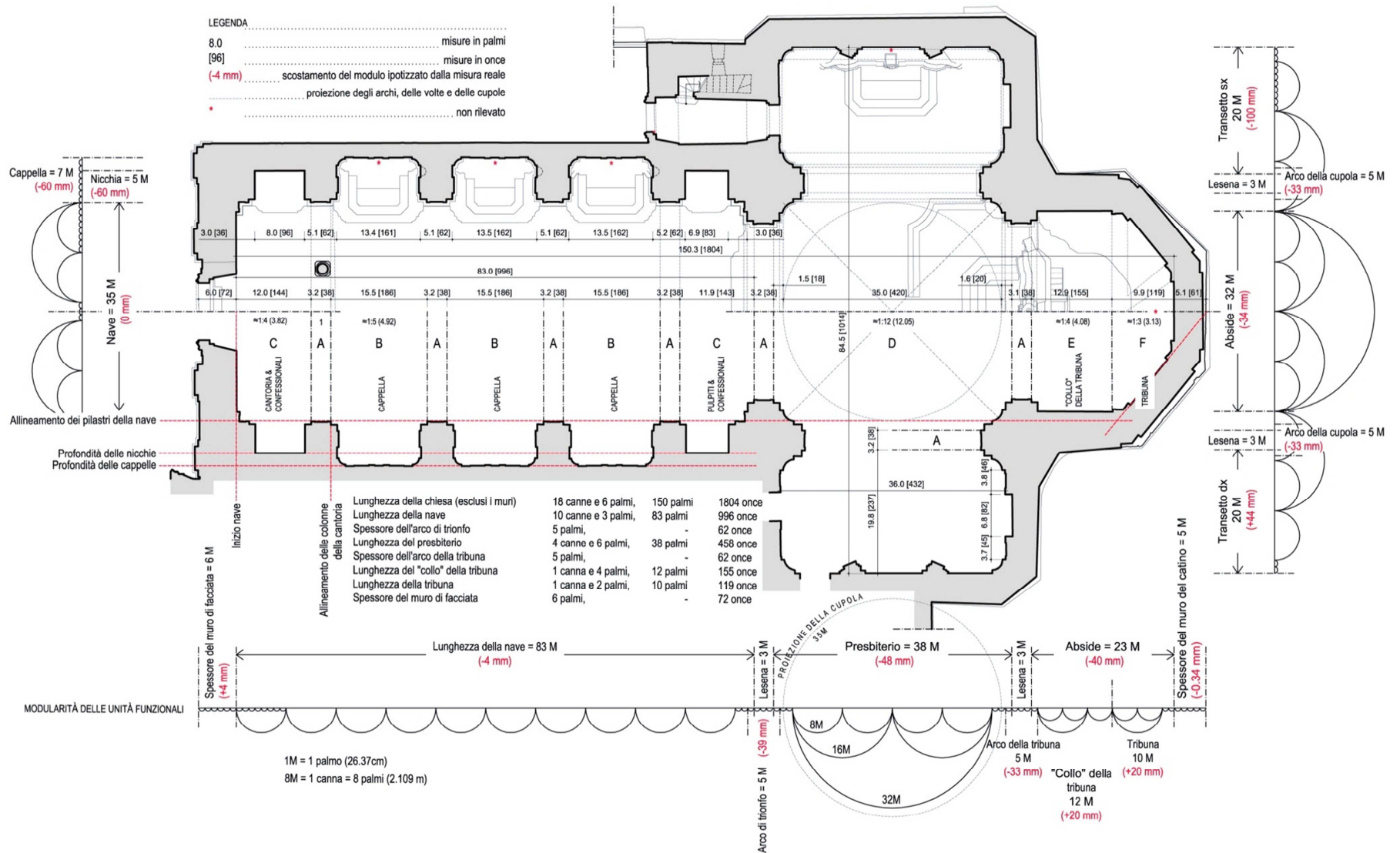


Fig. 4.26a – Chiesa di Santa Maria Assunta; ricerca dell'unità di misura e analisi della modularità.

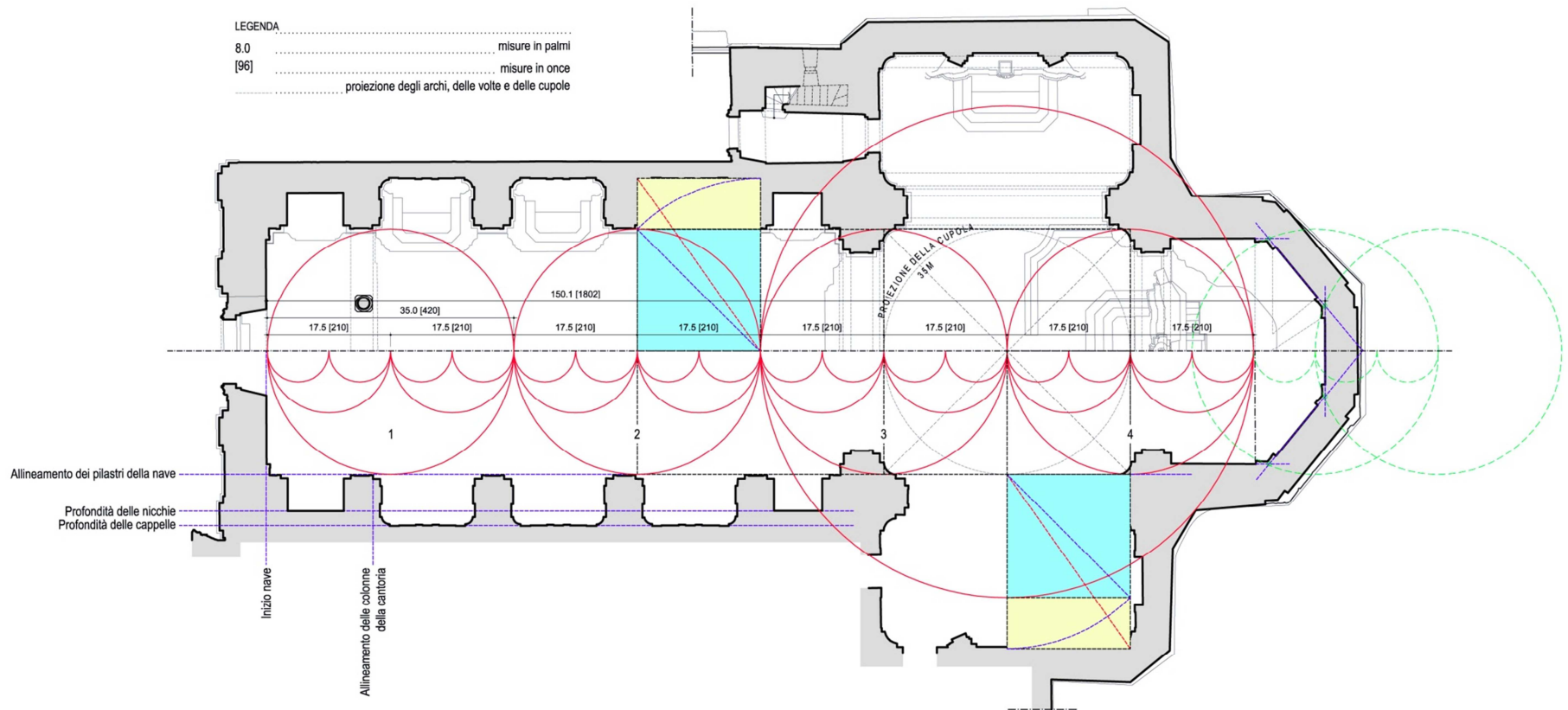
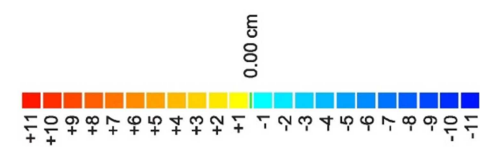
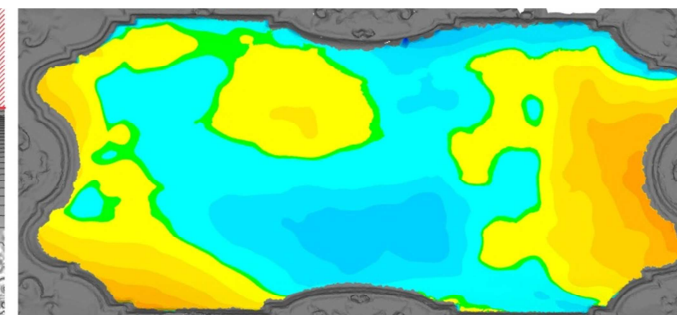


Fig. 4.26b – Chiesa di Santa Maria Assunta; ipotesi di proporzionamento geometrico mediante moduli e rettangolo dinamico.



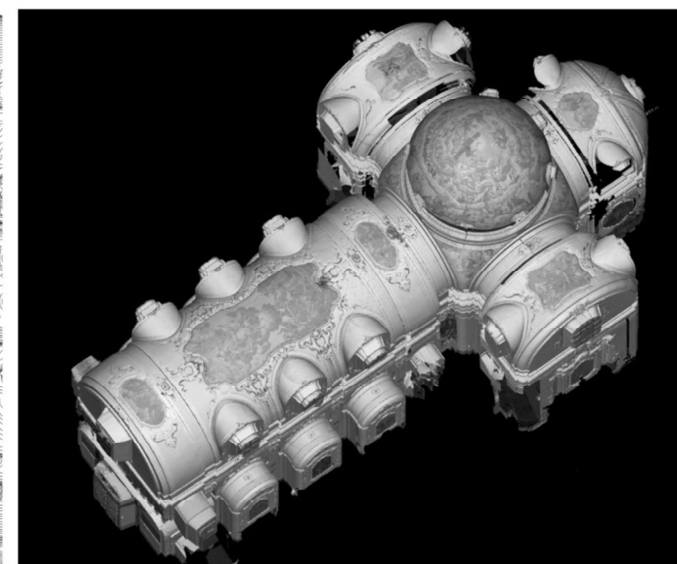
IPOGRAFIA DELL'AULA CON CURVE DI LIVELLO (PASSO=10 cm)



MAPPA DEGLI SCOSTAMENTI TRA LA MESH E IL CILINDRO IDEALE INTERPOLANTE (R5,42 m) LA SUPERFICIE DEL MEDAGLIONE AFFRESCATO



PARTICOLARE DELL'IPOGRAFIA DELL'AULA CON CURVE DI LIVELLO (PASSO=1 cm)



SISTEMA INTRADOSSALE

Fig. 4.27 – Chiesa di Santa Maria Assunta; volta a botte della navata e particolare del medaglione

Conclusioni

L'uomo, dunque, è originariamente votato alla tecnica per *compensare* l'insufficienza dei propri organi, per *intensificare* le capacità che possiede, e per *agevolare* il lavoro della costruzione del mondo da cui la sua esistenza dipende.

U. GALIMBERTI, *Psiche e tecne. L'uomo nell'età della tecnica* (2007), p. 171.

Nell'arco di poco più di dieci anni, cioè in un lasso di tempo “relativamente” breve, l'*iter* conoscitivo (metodi e procedure, prassi consolidate, tecnologie usuali, ...) del rilevamento tradizionale è significativamente variato in conseguenza del perfezionamento e dell'applicazione delle tecniche ottiche di misura 3D alla disciplina del Rilievo.

La *nuvola di punti*, risultato della fase di acquisizione, rappresenta il fattore determinante dell'*evoluzione dei rapporti dialettici* che il rilevatore instaura con il manufatto e la sua rappresentazione.

In altro modo, il modello numerico tridimensionale è un nuovo soggetto che *codifica in forma discreta* la continuità delle forme reali e si interpone tra l'opera e la sua restituzione, introducendo nel rilevamento un livello di *oggettività* elevato, sintesi della tecnologia e del metodo adoperati. Questo connubio consente di creare un *isomorfismo* tra nuvola e manufatto e, quindi, di scindere l'acquisizione dei dati dalle successive fasi di lettura/interpretazione, discretizzazione/razionalizzazione e misura¹⁴⁹. Ragione per cui, la nuvola di punti si configura come una *replica digitale* dell'opera (le cui modalità di “costruzione” ne definiscono il *campo di validità*), diventando

¹⁴⁹ La prima interpretazione del manufatto, momento cardine del rilevamento tradizionale, diventa quasi “ininfluente” ai fini dell'acquisizione dei dati, tramite tecniche ottiche: alla lettura critica dei caratteri dell'opera e alla traduzione in immagini dei processi cognitivi del rilevatore, si sostituisce la registrazione acritica di milioni di punti, registrati all'interno del *database*. Le logiche di funzionamento del mezzo tecnico, basate su principi fisici e optoelettronici, svincolano l'acquisizione dai processi percettivi del rilevatore.

veicolo potenziale di informazioni – nel momento in cui viene trasformata in *documento digitale* dall'interprete – e nuova opportunità per l'esplorazione virtuale di dati reali¹⁵⁰.

L'evoluzione dei rapporti indotta dal modello numerico, presenta due caratteri sostanziali:

- la *trasformazione del rapporto tra rilevatore e opera da rilevare*, che si concretizza con lo spostamento delle azioni – successive alla campagna di acquisizione – dal manufatto alla nuvola di punti. Questo straordinario potenziale operativo può avere un contraltare negativo nella *tendenza all'autosufficienza* del modello numerico rispetto alla realtà. Per controllare/limitare questa tendenza, proponiamo di affiancare la nuvola di punti con dispositivi grafici e con foto ad alta risoluzione, predisposti per *controllare “a priori”* l'autonomia del modello e *verificare “a posteriori”* gli esiti del “*dialogo creativo*” tra rilevatore, nuvola di punti e manufatto;
- il *capovolgimento del processo di produzione dei disegni*, dovuto alla presenza del modello digitale tridimensionale, fin dalla prima fase del rilievo; capovolgimento che spinge a dedurre dal modello stesso gli elaborati bidimensionali, o che simulano la terza dimensione e non a tracciare prima i disegni, che si svolgono sul piano e, sulla scorta di questi, a costruire un modello spaziale.

Il modello tridimensionale, sia nella forma discreta di nuvola di punti, che in quella di modello geometrico, è un insieme strutturato di dati in grado di ampliare i consueti scenari operativi/conoscitivi, di promuovere indagini, prima impensabili e di condurre l'analisi del manufatto in maniera più accurata e completa rispetto ai mezzi tradizionali. Queste potenzialità possono essere intese in termini di:

- *espansione delle capacità analitico-operative* rispetto agli esiti figurativi propri degli strumenti e dei metodi canonici;
- *approccio visuale dinamico interattivo*, come “strumento” per l'esplorazione attiva dei significati di un'architettura (promuovere indagini, stimolare riflessioni, dirigere l'attenzione su particolari aspetti, ...).

L'azione figurativa di un dispositivo grafico, formato da disegni che si svolgono sul piano, spesso raggiunge la sua massima capacità analitica, sia in

¹⁵⁰ Quanto detto può essere esteso anche ai modelli geometrici derivati dalla nuvola di punti.

virtù dell'uso contemporaneo di più disegni realizzati con metodi proiettivi (scale di rappresentazioni e tecniche di mediazione grafica differenti), che per le connessioni logiche “costruite” per dar vita a rimandi, puntualizzazioni e approfondimenti tra le figure. In sostanza, un contesto grafico siffatto è in grado di promuovere un “*dialogo creativo*” tra rilevatore, opera da rilevare e restituzioni.

Al pari di quanto detto per l'azione figurativa tradizionale, anche nel caso dell'interazione rilevatore-modello tridimensionale si può parlare di “*dialogo creativo*”, il cui contesto di riferimento è dato dall'ambiente virtuale, cioè dall'*hardware* e dal *software* utilizzato, dal modello tridimensionale stesso, dalla navigazione, esplorazione e “manipolazione” del modello.

É opportuno sfruttare il connubio tra le caratteristiche del modello tridimensionale (elevata qualità e quantità delle informazioni, natura delle informazioni, ...) e la possibilità di *simulare il manufatto*, ampliando gli esiti figurativi e le indagini tradizionali con le modalità proprie della tecnica usata, senza “dimenticare” i principi su cui si fonda l'efficacia del contesto grafico tradizionale.

Il manufatto simulato virtualmente permette di descrivere le tre dimensioni dell'architettura come volumi, materia e regole di aggregazione tra gli elementi, ma anche come spazio percepito, a differenza della figurazione mediante plastici, dove l'inversione del naturale rapporto di scala plastico/osservatore può portare ad errate previsioni percettive. La modellazione, la navigazione, la manipolazione, l'interrogazione, ..., sono azioni che favoriscono il *feedback* percettivo tra il rilevatore e l'ambiente virtuale, offrendo nuove opportunità di apprendimento spaziale.

Oltretutto possiamo intendere il modello tridimensionale non come un “semplice guscio” in cui sono registrati i dati relativi alla morfologia e all'apparenza visibile delle superfici, ma come il nucleo intorno cui organizzare ulteriori livelli informativi (documenti iconografici e fotografici, disegni, schede, *database*, ...). Si genera, pertanto, un sistema informativo potenzialmente in grado di operare un sostanziale cambiamento nelle *modalità di azione dell'interprete* (archiviazione, visualizzazione, esplorazione, analisi e trasmissione delle conoscenze acquisite), nella *costruzione di un sistema di conoscenze aperto* (flessibilità nell'aggiornamento dei dati e nell'aggiunta di

nuovi livelli informativi), nella *promozione dell'analisi interdisciplinare*.

Sulla base delle esperienze analizzate abbiamo dedotto la qualità e l'entità delle modifiche sulle procedure del rilevamento, individuando: nell'integrazione delle tecniche *range-based* e *image-based*, nell'uso combinato dei sensori *range-based*, nella modellazione poligonale multi-risoluzione con applicazione della *texture*, nella realizzazione di sistemi informativi basati sul modell tridimensionale, i "concetti-chiave" comuni alle varie unità di ricerca (anche se declinati con accenti differenti), che costituiscono fattori correnti dell'azione di rilievo.

Inoltre il metodo predisposto per la lettura critica delle esperienze (tabelle, diagrammi, studio analitico dei prodotti delle singole ricerche schedate) ha dato la possibilità di approfondire i modi con cui le tecniche ottiche di misura 3D incidono sui problemi trattati dal rilievo e "vincolano" le restituzioni grafiche. Abbiamo riscontrato che queste tecniche spesso tendono a proporre problematiche coerenti alle loro potenzialità e modalità operative/conoscitive (elevata accuratezza, ricerca della verosimiglianza, ...), conformando a queste ultime i caratteri la restituzione grafica.

Le tecniche *range-based* e *image based* spingono verso: una maggiore precisione nel descrivere le geometrie reali, una restituzione verosimile in termini percettivi (riproducendo forme, materiali e colori delle superfici), la ricostruzione virtuale di ambienti e manufatti, l'uso di visite virtuali e sequenze animate, etc., ponendo quasi in secondo piano le rappresentazioni di natura analitica (ricerca delle logiche compositive, degli allineamenti e dei proporzionamenti, simulazione di situazioni percettive, ...).

Si tende alla costruzione di modelli figurativi identici al manufatto reale¹⁵¹, non solo quando queste tecniche rappresentano una formidabile opportunità d'analisi (mappatura dei fenomeni di degrado e di dissesto, lettura degli elevati, ...), ma sempre e comunque, anche quando le condizioni operative più opportune richiederebbero la selezione delle informazioni (logiche compositive, razionalizzazione della forma, ...).

Terminiamo ricordando che nelle operazioni del rilevamento tradizionale si

¹⁵¹ La somiglianza al vero può anche essere spinta fin oltre la percezione visiva che si intaura tra osservatore e manufatto, creando situazioni utili per apprezzare le caratteristiche più minute della superficie.

solito predomina una restituzione efficace, in senso compositivo/costruttivo (attenzione alle logiche geometrico-formali, al rapporto-forma tecnologia, ...), mentre con le tecniche di misura 3D assumono un ruolo predominante le verifiche metriche accurate e la possibilità di dar vita a figurazioni simili al vero.

SCHEDE

Elenco delle schede

ARCHITETTURE

Hagia Sofia (Istanbul)
 La Sala delle Cariatidi (Palazzo Reale, Milano)
 La Cripta di Santa Cristina (Carpignano Salentino, Lecce)
Digital Cathedral of Pisa
 Il complesso architettonico del Patirion (Rossano, Cosenza)

SITI ARCHEOLOGICI

L'Eretteo (Atene)
 Il Foro Civile di Pompei

SCULTURE

The Digital Michelangelo Project & The Digital Forma Urbis Romae Project
The Digital Minerva Project
 La "Maddalena" di Donatello
 Il "David" di Donatello

PITTURE

L'"Adorazione dei Magi" di Leonardo da Vinci
 La "Gioconda" di Leonardo da Vinci

UNITÀ DI RICERCA

Università degli Studi di Roma La Sapienza-Dipartimento di Rilievo, Analisi e Disegno dell' Ambiente e dell' Architettura. (C. Bianchini, M. Docci, P. Paolini, et al.).

ANNO

2003.

DESCRIZIONE

La chiesa di Santa Sofia, voluta dall'imperatore Giustiniano, è stata progettata da Antemio di Tralle e Isidoro di Mileto il vecchio (532-537 d. C.). La cupola, del diametro di 31,23 m circa, è impostata su quattro pennacchi sferici sorretti da altrettanti archi che scaricano su pilastri. Questa parte centrale originaria è stata completata – successivamente – con due absidi voltate (e arricchite da esedre), poste lungo la direttrice est-ovest, con funzione di contrafforti della cupola; mentre in direzione nord-sud, sono state realizzate due navate voltate a botte.

Le soluzioni costruttive adottate creano un sistema che contrasta le spinte della cupola in maniera disomogenea e che si è manifestata – nel corso del tempo – con assestamenti, crolli e susseguenti rifacimenti che hanno modificato la geometria della cupola. La campagna di rilievo, iniziata nel luglio 2003, prevede la definizione della forma geometrica e delle deformazioni dell'intradosso della cupola e degli elementi che la reggono.

OBIETTIVO

Analisi della morfologia e definizione metrica delle deformazioni dell'intradosso della cupola per la sua messa in sicurezza.

KEYWORD

Laser scanner TOF, allineamento guidato dalla stazione totale integrata, analisi delle deformazioni della cupola.

STRUMENTI E METODO

– *Laser scanner* HDS 2500 (Leica Geosystems), sistema TOF ad impulsi:

precisione su singolo punto: (da 1,5 a 50 m)	posizione	±6 mm,
	distanza	±4 mm,
	angolo orizzontale	± 60 microradiani,
	angolo verticale	±60 microradiani;
dimensione dello <i>spot laser</i> :	≤ 6 mm (da 0 a 50 m);	
campo visivo:	40°x40°;	

range d'acquisizione:	da 1,5 m a 50 m (portata efficace ottimale), massimo fino a 100 m;
velocità di scansione:	fino a 1.000 punti/s;
peso:	20,5 kg.
– <i>Stazione totale integrata Zeiss Rec-Elta 15 (Trimble):</i>	
precisione angolare:	angolo orizzontale 1 milligon, angolo verticale 1 milligon;
precisione sulle distanze:	5 mm + 3 ppm;
range di misura:	da 1,9 m fino a 1000 m con 1 prisma.

La campagna di rilievo di Santa Sofia è inserita all'interno del progetto “*Unimed Cultural Heritage 2*” che ha avuto come *focus* lo studio della staticità della cupola al fine di ideare un sistema per la sua messa in sicurezza. In quest'ottica, è stato scansionato il volume interno sotteso alla cupola e ai pennacchi sferici con un *laser scanner* TOF ad impulsi HDS 2500 della Leica Geosystems.

I singoli *scanworld* sono stati allineati mediante una serie di punti d'appoggio naturali battuti dalla stazione totale integrata Zeiss Rec-Elta 15, realizzando una poligonale d'appoggio aperta per la georeferenziazione delle singole riprese. Sono stati necessari 17 *scanworld* per ottenere il modello numerico completo della parte in questione, ottenendo una “nuvola” di 60 milioni di punti, con una maglia di scansione dal passo teorico di 4x4 cm. Gli elementi utilizzati con punti di appoggio naturali per l'allineamento degli *scanworld*, sono stati battuti con la stazione totale e acquisiti dal *laser scanner* con una maglia di 1x1 mm.

Successivamente, dalla nuvola di punti sono state estratte una sequenza di sezioni al fine di ottenere un modello geometrico della cupola, sfruttando tali sezioni come direttrici e generatrici delle superfici. L'obiettivo è quello di ottenere un modello geometrico accurato dell'intradosso della cupola per poterne valutare la forma e studiare le deformazioni dovute agli interventi di rifacimento che si sono stratificati in seguito a crolli e terremoti. Le superfici che definiscono il modello geometrico della cupola sono formate da curve NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*). Dalla nuvola di punti sono state ottenute 62 sezioni orizzontali (con piano parallelo alle imposte) ad un passo costante di 25 cm, successivamente esportate in Autocad 2000 dove sono state organizzate in *layer* differenti ed ottimizzate per la costruzione di superfici NURBS (ripristinando la continuità, cioè eliminando le interruzioni che non le rendono adatte alla generazione di superfici).

Dopo questa fase di *pre-processing*, le curve sono state esportate in Rhinoceros e ne sono state scelte 45 (le più significative per descrivere le deformazioni più accentuate)

per essere utilizzate come direttrici, mentre le sezioni fatte lungo le vele sono state usate come generatrici.

Si è ottenuto un modello geometrico della cupola formato da superfici NURBS e, da questo, sono state dedotte una serie di viste tridimensionali e bidimensionali (pianta, prospetti e sezioni) per evidenziarne le deformazioni. Per analizzare in maniera quantitativa dette deformazioni, sono state confrontate le circonferenze teoriche (ad una determinata quota) con le sezioni, ricavando valori massimi di 80-100 cm; inoltre è stata costruita la sfera ideale che meglio approssima la cupola individuandone il centro al di sotto del piano d'imposta reale di 1,97 m. I costoloni della cupola, sezionati lungo la linea mediana, hanno evidenziato la mancata convergenza di alcuni di essi verso il centro della cupola, ed in particolare di quelli ricostruiti in seguito a crolli. La circonferenza teorica dell'imposta della cupola si discosta, dalla curva reale, soprattutto lungo la direzione nord-sud (a causa della spinta esercitata e dei cedimenti differenziale dei pilastri), assumendo una forma ovoidale con asse maggiore disposto lungo questa direzione.

Lo studio sugli arconi posti lungo la direttrice est-ovest ha messo in evidenza che il loro intradosso è formato da due tronchi di cono circolare e non cilindrico, a realizzare – forse – una correzione ottico-percettiva.

RISOLUZIONE

passo di campionamento	generale:	4x4 cm;
	elementi usati per l'allineamento:	1x1 mm.

SOFTWARE

Autodesk Autocad 2000 (creazione di *layer*, misura);

Rhinoceros, NURBS modelling for windows (creazione e gestione delle superfici NURBS).

PRODOTTI

Nuvola di punti del volume interno sotteso alla cupola e ai pennacchi sferici; modello 3D della cupola formato da superfici NURBS; dal modello 3D sono stati ottenuti elaborati grafici bidimensionali (pianta, prospetti e sezioni) e tridimensionali per la valutazione qualitativa e quantitativa delle deformazioni; dalla nuvola di punti sono state estratte immagini in falsi che evidenziano le zone sottoposte a rifacimento.

PUBBLICAZIONI

C. BIANCHINI, M. DOCCI, *Il progetto UNIMED. Cultural Heritage 2 e Hagia Sophia a Istanbul*, in R. M. STROLLO (a cura di), "Disegno e conoscenza. Contributi per la storia e l'architettura", Roma Aracne Editrice, 2006, pp. 61-73.

P. PAOLINI, *Nuove tecnologie nell'Impero d'Oriente: Hagia Sofia ad Istanbul*, in M. DOCCI, "Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e

dell'ambiente”, (ricerca Cofin 2002, coord. naz. Mario Docci), Roma Gangemi Editore, 2005, pp. 34-41.

A. IPPOLITO, *Elaborazione tridimensionale e analisi del modello della cupola di Hagia Sofia*, in M. DOCCI, “Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e dell'ambiente”, (ricerca Cofin 2002, coord. naz. Mario Docci), Roma Gangemi Editore, 2005, pp. 42-47.

M. DOCCI, M. DOCCI, *L'uso della riflettonza: un nuovo capitolo per il restauro delle superfici*, in M. DOCCI, “Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e dell'ambiente”, (ricerca Cofin 2002, coord. naz. Mario Docci), Roma Gangemi Editore, 2005, pp. 48-51.

C. BIANCHINI, P. PAOLINI, *Rilievo per il restauro e la messa in sicurezza di Hagia Sophia a Istanbul: prime sperimentazioni*, in “Disegnare. Idee, Immagini” n. 26/2003, pp. 20-31.

M. DOCCI, *Hagia Sophia. Analisi del rilevamento interno*, in “Disegnare. Idee, Immagini” n. 26/2003, pp. 32-45.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

E. DURUKAL, M. ERDIK, *Proteggere Hagia Sophia dai terremoti: una sfida per l'ingegneria e la conservazione*, in “Disegnare. Idee, Immagini” n. 26/2003, pp. 8-19.

LA SALA DELLE CARIATIDI (PALAZZO REALE, MILANO)

2

UNITÀ DI RICERCA

Politecnico di Milano-Facoltà del Design. (F. Brevi, M. Gaiani et al.).

ANNO

2003-2004.

DESCRIZIONE

La Sala delle Cariatidi venne realizzata alla fine del Settecento su progetto di Giuseppe Piermarini, il quale dà vita all'ambiente di rappresentanza più ampio e sfarzoso di Palazzo Reale, nonché uno dei più grandi saloni d'Europa. La sala, delle dimensioni di 40x15x18m, era – originariamente – coperta a volta e scandita da 40 lesene arricchite da altrettante cariatidi a sorreggere – fittiziamente – la balconata, non più esistente, disposta lungo tutto il perimetro. Tale suddivisione delle pareti dell'ordine inferiore, si prolunga sino a quello superiore, scandito da semicolonne corinzie a sorreggere il cornicione di coronamento. Le lesene e le semicolonne impongono una rigida partitura delle pareti, nella quale si organizzano le finestre alternate a specchi (nel primo ordine) e finestre, vere o finte, alternate a 18 statue.

La sala fu bombardata nell'agosto del 1943. L'incendio conseguente fece crollare il tetto, la volta, la balconata e danneggiò fortemente gli stucchi. Per due anni la sala, senza alcuna copertura, restò esposta alle intemperie che ne hanno accentuato lo stato di degrado. I lavori di ricostruzione iniziarono nel 1947 e terminarono nel 1951.

OBIETTIVO

Modellazione tridimensionale della sala per simulare un cantiere virtuale di restauro e visualizzazione semi-immersiva in *real-time* di parte della sala.

KEYWORD

Range camera a triangolazione, fotogrammetria digitale, integrazione di tecniche attive e passive, modello 3D, realtà virtuale semi-immersiva, *real-time rendering*.

STRUMENTI E METODO

- *Range camera* a triangolazione MINOLTA-Vivid 910 (Konica Minolta) con lente da 8 mm (*wide*):
 - sensore CCD: 640x480 pixel (24 bit);
 - volume di misura: da 100x80x40 mm (tele) a 1200x900x750 mm (wide);
 - profondità di campo: da 60 cm a 250 cm
(*range* di misura ottimale: da 60 cm a 120 cm);
 - precisione: x= ±0,22 mm, y= ±0,16 mm, z= ±0,10mm (tele);

illuminazione ambientale: inferiore a 500 lux.

– *Fotogrammetria digitale*

fotocamera Fuji FinePix S2 Pro con obiettivo Nikkor 24 mm 1:2:8;

sistema d'illuminazione: 2 flash da 2000 kW con diffusore bank e 2 torce da 1200 kW;

Realviz Image Modeler.

– *Teatro virtuale:*

schermo piatto di 5x2,2 m retroproiettato;

sistema di retroproiezione con 2 CTR BarcoReality 909;

strumentazione Active Stereo;

sistema Motion Tracking;

sistema Cluster Windows;

sistema Realtà Virtuale Stereo portatile.

L'idea di base è quella di abbinare al tradizionale cantiere di restauro (necessariamente limitato ad una parte del salone e legato alla sua disponibilità fisica, invasivo e costoso), un cantiere virtuale imperniato sulla ricostruzione di un modello tridimensionale di una porzione della sala, al fine di sperimentare varie ipotesi d'intervento.

Il progetto completo è stato articolato in tre fasi. Nella prima è stata rilevata la sala, cioè sono stati acquisiti i dati geometrici dello stato di fatto, usati nella seconda fase per costruire modelli tridimensionali fotorealistici con diversi livelli di accuratezza (derivando anche i modelli per la visualizzazione *real-time*). La terza fase è stata quella più propriamente progettuale, in cui si sono state simulate e valutate varie situazioni progettuali.

La parte della sala di cui è stato ricostruito il modello 3D coincide con il cantiere di restauro tradizionale ed ha dimensioni di 6x12x1,5 m.

Per la modellazione si è scelto di integrare tecniche attive (*range camera* a triangolazione) con tecniche passive (fotogrammetria); le sculture (le cariatidi e le statue) e gli elementi a geometria complessa (i capitelli delle semicolonne, ...) – in sostanza gli elementi che presentano geometrie *freeform* – sono stati acquisiti con la *range camera* a triangolazione Minolta Vivid 910¹, mentre il resto dell'architettura è stato ottenuto mediante tecniche di modellazione *feature-based*. La distanza di ripresa è stata limitata tra 60 e 120 cm, mentre per il passo di campionamento è stato usato uno *step* di 1 mm con un'incertezza lungo la z di circa 0,8 mm (un sigma), mentre la tolleranza della fotomodellazione è pari a 4 mm.

La fotogrammetria digitale, da un lato, permette di ottenere velocemente ampie superfici che non hanno geometrie complesse e quindi definibili con un numero limitato di dati; dall'altro, attraverso la definizione di una serie punti di controllo,

fornisce la “griglia” su cui assemblare, sia gli elementi a geometria complessa scanditi con la *range camera*, che quelli ottenuti tramite modellazione *feature-based*². Un metodo efficiente, sia dal punto di vista dei tempi, che dal punto di vista della “pesantezza” in termini di megabyte.

RISOLUZIONE

cariatidi, statue e capitelli delle semicolonne	risoluzione (in xy):	±1 mm;
	in profondità (lungo z):	0,8 mm;
tutto il resto dell’architettura	risoluzione:	±4 mm.

SOFTWARE

Polyworks™ Modeler e Rapidform (allineamento e *meshing*);
Realviz Image Modeler (fotogrammetria digitale).

PRODOTTI

Modelli poligonali 3D (*mesh*) della parte di salone in oggetto, con differenti livelli di dettaglio e mappata con *texture* fotografica ad alta risoluzione.

PUBBLICAZIONI

F. BREVI, N. CECCARELLI, L.L. MICOLI, A. PIGNATEL, M. RUSSO, *Realtà Virtuale e Restauro: il caso della Sala delle Cariatidi*, in atti del convegno “La Sala delle Cariatidi di Palazzo Reale: il cantiere di studio”, Milano Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Lombardia-Edizioni Et, 2006.

M. GAIANI, L.L. MICOLI, M. RUSSO, *The Monuments Restoration Yard: a Virtualization Method and the Case of Study of Sala delle Cariatidi in Palazzo Reale, Milan*, in Proceedings of “ISPRS Meeting (3D-ARCH), 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures”, Venezia 22-24 Agosto 2005, Vol. XXXVI parte 5/W17, pp. 191-202.

F. BREVI, N. CECCARELLI, M. GAIANI, *Un cantiere di restauro virtualizzato*, in “Disegnare, Idee, Immagini” n. 29/2004, pp. 64-79.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

S. F. EL-HAKIM, J.-A. BERARDIN, M. PICARD, G. GODIN, *Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques*, in “IEEE Computer Graphics and Applications”, Vol. 24, n. 3, 2004, pp. 21-29.

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, S. CIOFI, C. ATZENI, *Fusion of range camera and photogrammetry: a systematic procedure for improving 3D models metric accuracy*, in “IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics”, Part B, Vol. 33, n. 4, 2003, pp. 667-676.

F. BERNARDINI, H. RUSHMEIER, *The 3D model acquisition pipeline*, in “Eurographics 2000 State of the Art Report” (STAR 2000), 2000.

SITOGRAFIA

L. L. MICOLI, M. RUSSO, *Il rilievo digitale di complessi architettonico-scultorei come base per il progetto di restauro. L'esperienza della Sala delle Cariatidi al Palazzo Reale di Milano*, La documentazione on-line dei Beni Culturali, Il Rilievo di Architettura, 2004;

<http://rilievo.stereofot.it/convegno04/interventi/relazioni/06Polimi>. (consultato il 6-8-2009)

¹ Sono stati acquisite tutte le tre cariatidi e la statua comprese nella parte di sala di cui si è ricostruito il modello 3D, mentre uno solo dei tre capitelli è stato scandito.

² Per la fotogrammetria sono state usate 4 immagini (4256x2848 pixel) che hanno richiesto un tempo di presa di mezza giornata. Mentre con il *laser scanner* sono state acquisite 300 *range map*, per un tempo di acquisizione effettivo di 15 ore.

LA CRIPTA DI SANTA CRISTINA (CARPIGNANO SALENTINO, LECCE)

3

UNITÀ DI RICERCA

Coordinamento SIBA-Università degli Studi di Lecce; NRC Canada. (V. Valzano, A. Bandiera, J.-A. Beraldin et al.).

ANNO

2000-2004.

DESCRIZIONE

La Cripta bizantina di Santa Cristina (Carpignano Salentino, Lecce) è una chiesa rupestre del X secolo, caratterizzata da un ciclo di affreschi che vanno dal 959 (i più antichi della Puglia) alla seconda metà dell'XI secolo, e riportano le date, le firme degli artisti e i committenti. La Cripta (16,5x7,5x2,5 m), scavata nella roccia, è suddivisa in due navate originariamente separate da due pilastri. Nel corso dei secoli la chiesa è stata rimaneggiata più volte. Ricordiamo l'aggiunta di un altare barocco, mentre il crollo di uno dei due pilastri suddetti ha reso necessaria la sua sostituzione con altri tre pilastri.

OBIETTIVO

Realizzazione di un modello tridimensionale con *texture* fotografica ad alta risoluzione della Cripta, finalizzato alla documentazione per il restauro, alla promozione e alla valorizzazione.

KEYWORD

Range camera a triangolazione, fotogrammetria digitale, integrazione di tecniche attive e passive, modello 3D mappato con *texture* fotografica ad alta risoluzione, realtà virtuale.

STRUMENTI E METODO

- *Range camera* a triangolazione MENSIS-Soisic™ 2000 SD:
 - campo visivo: 46°x320°;
 - range* d'acquisizione: da 0,80 m a 10 m;
 - incertezza lungo z (1 sigma): 0,3 mm (a 0,8 m), 0,4 mm (a 2,5 m), 0,6 mm (a 4 m);
 - velocità di scansione: 100 punti/s.
- *Fotogrammetria digitale*:
 - fotocamera Nikon D1x;
 - sensore CCD: 3008x1960 pixel;

sistema d'illuminazione: torce con flash allo xeno (temperatura di colore di circa 5600 K);

ShapeCapture™ (ShapeQuest Inc.).

La modellazione della Cripta di Santa Cristina e della chiesa di San Pietro (Otranto), fa parte del progetto “3D Bizantino”, iniziato nel 2000 dal Coordinamento SIBA dell'Università degli Studi di Lecce, che prevede l'acquisizione e la modellazione digitale di strutture e chiese bizantine sotterranee e *sub divo* sia del Salento che dell'Italia Meridionale. Questo progetto si inserisce nel più ampio “3D Database”. Tale progetto prevede l'acquisizione digitale, la modellazione e la visualizzazione stereoscopica interattiva dei modelli tridimensionali, nonché il restauro virtuale dei Beni Culturali (reperti archeologici, oggetti di pregio, ambienti e architetture) al fine di promuoverli e valorizzarli¹.

Per modellare l'esterno, cioè l'ingresso principale e secondario, è stata utilizzata la fotogrammetria digitale; mentre l'interno della Cripta è stato acquisito con un *laser scanner* che restituisce un nuvola di punti non strutturata. Le immagini ad alta risoluzione mappate sulla *mesh* sono state acquisite separatamente con una fotocamera digitale Nikon D1x (non sono state usate le immagini dello scanner). Per rendere uniforme l'illuminazione (condizione necessaria per una buona ripresa fotografica) e per non danneggiare gli affreschi con il calore e i raggi UV generati dalle lampade ad alta potenza, sono state utilizzati flash con lampade allo xeno dotate di filtro UV e con una temperatura di colore di circa 5600 K.

La campagna di scansione dell'interno della Cripta è stata condotta con un *laser scanner* Soisic™ 2000 SD (Mensi), utilizzando un passo di campionamento, nelle due direzioni, di 5 mm con un'incertezza stimata lungo *z* di 0,5 mm (a 2,5 m)². Per la Cripta sono state fatte 50 scansioni, mentre 30 sono state necessarie per il solo altare barocco, il tutto per un totale di 92 ore (tempo di scansione di ogni *range map* compreso tra 20-80 minuti)³.

Per la registrazione delle *range map* sono state utilizzate due tecniche e poi confrontati i risultati. Nel primo caso sono state adoperate delle sfere distribuite efficacemente sulla scena per guidare l'allineamento tramite algoritmo ICP, seguito da un allineamento globale; nel secondo caso si è usato il solo algoritmo ICP. Le sfere sono state disposte a formare i vertici di un triangolo e posizionate sul pavimento in maniera che due *range map* adiacenti avessero una terna in comune⁴. L'errore tra la prima e l'ultima *range map* è stato di 16,87 mm, 16,37 mm e 18,15 mm, rispettivamente sulla prima, seconda e terza sfera. Un allineamento migliore è stato ottenuto con il solo algoritmo ICP (senza sfere), seguito da un allineamento globale. L'errore, in questo secondo caso, è stato di 0,8 mm. Normalmente l'uso delle sfere

nell'allineamento fornisce buoni risultati quando vi sono molte superfici piane oppure quando la geometria è tale da non permettere la costruzione di un modello "chiuso", cosa che non succede per la Cripta.

Nel 2002, erano stati prodotti tre modelli con differenti livelli di dettaglio:

- un modello senza *texture* di tutta la Cripta, con risoluzione di 10 mm (4,6 milioni di triangoli);
- un modello di tutta la Cripta (0,4 milioni di triangoli);
- un modello sezionato con *texture* fotografica della Cripta, con risoluzione di 5 mm (12,8 milioni di triangoli).

Inoltre è stata realizzata una visita virtuale (2002) del modello mappato con la *texture* fotografica, che promuove l'opera mostrando, contemporaneamente, le potenzialità del modello 3D e delle nuove tecnologie informatiche nel campo della valorizzazione e del restauro virtuale dei Beni Culturali. Nel 2004 è stato sviluppato anche un ologramma (180x85 cm) del modello tridimensionale della Cripta.

Dai modelli 3D sono stati estratti, quali piani e sezioni (in particolare le immagini raddrizzate degli affreschi), oltreché sezioni assonometriche e viste prospettiche, nell'ottica della documentazione, della valorizzazione e della fruibilità.

RISOLUZIONE

laterale (in xy):

$\Delta x, \Delta y \approx 5$ mm (sulle pareti);

$\Delta x, \Delta y \approx 15$ mm (sul soffitto e sul pavimento);

incertezza lungo z:

$\sigma z \approx 0,5$ mm (a 2,5 m), stimata

$\sigma z \approx 0,8$ mm (a 2,5 m), misurata;

risoluzione spaziale per la *texture*:

$\delta x, \delta y \approx 0,5-1$ mm (per le iscrizioni).

SOFTWARE

Polyworks™ Modeler (*align, merge, edit, compress*);

ShapeCapture™ (fotogrammetria digitale).

PRODOTTI

Modelli poligonali 3D (*mesh*) con differenti livelli di dettaglio, con e senza *texture* fotografica ad alta risoluzione; una visita virtuale del modello mappato con la *texture* fotografica ad alta risoluzione; un ologramma per la visualizzazione del modello tridimensionale della Cripta; elaborati tradizionali; elaborati bidimensionali e tridimensionali dedotti dalla *mesh* (piante, sezioni, immagini raddrizzate degli affreschi, sezioni assonometriche e viste prospettiche).

PUBBLICAZIONI

J.-A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, E. PAQUET, S. PETERS, M. RIOUX, V. VALZANO, A. BANDIERA, *Virtual Heritage: The cases of the Byzantine Crypt of Santa Cristina and Temple C of Selinunte*, in Proceedings of "X International Conference on

Virtual Systems and Multimedia” (VSMM 2004), Ogaki (Giappone), 17-19 novembre 2004.

V. VALZANO, A. BANDIERA, J.-A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, *Virtual Heritage: the cases of the Byzantine Crypt of Santa Cristina and Temple C of Selinunte*, in Proceedings of “IX Convegno della Associazione Italiana Intelligenza Artificiale” (AI*IA), Perugia (Italia), 15 settembre 2004.

V. VALZANO, A. BANDIERA, J.-A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, Carpiniana. *A Virtualized Byzantine Crypt*, in Proceedings of “Electronic Imaging and the Visual Arts” (EVA 2003), Firenze (Italia), 24-28 marzo 2003, pp. 169-173.

J.-A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, V. VALZANO, *Virtualizing a Byzantine Crypt: challenge and impact*, in Proceedings of “IS&T/SPIE Annual Symposium, Electronic Imaging, Science and Technology”, Santa Clara (USA), 20-24 gennaio 2003, vol. 5013, pp. 148-160.

J.-A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, V. VALZANO, *Carpiniana: A Virtualized Byzantine Crypt*, in “Enter the past: the e-Way into the Four Dimensions of Cultural Heritage Congress”, Vienna (Austria), 8-12 aprile 2003.

J.-A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, V. VALZANO, A. BANDIERA, A. LATOUCHE, *Virtualizing a Byzantine Crypt by Combining High-resolution Textures with Laser Scanner 3D Data*, in Proceedings of “VIII International Conference on Virtual Systems and MultiMedia” (VSMM 2002), Oral Session 1: Virtual Heritage 1 (VH1), Gyeongju (Corea), 25-27 settembre 2002, pp.3-14.

J.-A. BERARDIN, M. PICARD, S. F. EL-HAKIM, G. GODIN, A. LATOUCHE, V. VALZANO, A. BANDIERA, *Exploring a Byzantine Crypt Through a High-Resolution Texture Mapped 3D Model: Combining Range Data and Photogrammetry*, in Proceedings of “International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording-Complementing or Replacing Photogrammetry”, Corfu (Greece), 1-2 settembre 2002, pp. 65-70.

SITOGRAFIA

Home page del “Progetto 3D database” (Coordinamento SIBA-Università degli Studi di Lecce);

<http://siba3.unile.it/3ddb/index.htm>. (consultato il 14-8-2009)

Home page del “Progetto 3D bizantino” (Coordinamento SIBA-Università degli Studi di Lecce);

http://siba3.unile.it/3ddb/crupta_carpiniana.htm. (consultato il 14-8-2009)

¹ Nell'ambito del "3D Database" sono stati avviati tre progetti: "3D Bizantino", "3D Aquatic Biodiversity" e "3D Archeo".

All'interno del primo progetto, oltre alla Cripta di Santa Cristina, è stata acquisita e modellata la chiesa bizantina di San Pietro in Otranto risalente alla fine IX e l'inizio X secolo. Il modello 3D è stato realizzato integrando *laser scanner* e fotogrammetria digitale (scansione: 2005)

Il progetto "3D Aquatic Biodiversity", avviato nel 2006, applica la modellazione 2D e 3D alla biodiversità acquatica.

Il progetto "3D Archeo" prevede l'acquisizione e la realizzazione di modelli tridimensionali di reperti, ambienti e siti archeologici dell'Italia Meridionale, da inserire in appositi *database* per l'archiviazione digitale. Al momento, annovera i seguenti sottoprogetti:

- *Stele e Cippi*. Riguarda l'acquisizione e la modellazione tridimensionale di stele (VIII-VII secolo a.C.) e cippi (III sec. a.C.), ritrovati nel territorio salentino; (novembre 2000-gennaio 2001)

strumenti: *range camera* a triangolazione MENSISoistic™ 2000 SD;

prodotti: modelli 3D (*mesh*) mappati con texture fotografica; immagini raddrizzate dedotte dal modello 3D;

home page: http://siba3.unile.it/3ddb/stele_cippi.htm.

- *Serra Cicora (Nardò)*. Sono stati scansionati e modellati circoli funerari e reperti di scavo scoperti nella Necropoli neolitica di Serra Cicora; (2004)

strumenti: *range camera* a triangolazione MENSISoistic™ 2000 SD;

prodotti: modello 3D con ombreggiatura sintetica; immagine raddrizzata del circolo funerario T12 della piante dedotta dal modello 3D; profili estratti dal modello 3D; realizzazione di un GIS archeologico;

home page: http://siba3.unile.it/3ddb/serra_cicora.htm.

- *Grotta dei Cervi (Porto Badisco)*. Il progetto prevede l'acquisizione, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione virtuale della Grotta dei Cervi di Porto Badisco; (2004 ad oggi)

strumenti: *range camera* a triangolazione "Big Scan" sviluppato dal NRC (Canada);

prodotti: modelli 3D (*mesh*) mappati con *texture* fotografica ad alta risoluzione (4.500x3.000 pixel); visite virtuali;

home page: http://siba3.unile.it/3ddb/grotta_cervi.htm.

- *Metope di Selinunte*. Nell'ambito di questo progetto sono state modellate le metope provenienti dal tempio C di Selinunte. La sala del Museo Archeologico Regionale di Palermo, dove le metope sono conservate, è stata modellata con la fotogrammetria digitale. Successivamente si prevede la ricostruzione di un modello 3D del tempio C. Inoltre è stato realizzato il modello 3D di una delle metope del tempio F raffigurante il gigante Encelado; (inizio del progetto 2003)

strumenti: *range camera* a triangolazione MENSISoistic™ 2000 SD;

range camera a triangolazione MINOLTA-Vivid 900 (Konica Minolta);
fotogrammetria digitale;

prodotti: modello 3D con ombreggiatura sintetica e con *texture* fotografica ad alta risoluzione; immagini raddrizzate dedotte dal modello 3D; animazioni; un documentario;

home page: http://siba3.unile.it/land_lab/metope.htm.

-
- *Zeus di Ugento*. Modellazione della statua bronzea conosciuta come lo Zeus di “Ugento”; (2004)
strumenti: *range camera* a triangolazione ShapeGrabber SG-102;
prodotti: modello3D con ombreggiatura sintetica;
home page: http://siba3.unile.it/land_lab/zeus.htm.
- ² L’incertezza misurata è pari a 0,8 mm (a 2,5 m).
- ³ Il tempo necessario per l’allineamento, le verifiche e la modellazione ammonta ad un mese.
- ⁴ La buona riuscita del metodo d’allineamento con le sfere si fonda – in massima parte – sulla definizione della distanza media tra le sfere (lato del triangolo).

UNITÀ DI RICERCA

Visual Computing Lab dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione (ISTI-CNR, Pisa); DIAPReM, Università di Ferrara. (R. Scopigno, M. Balzani et al.).

ANNO

2005-2007.

DESCRIZIONE

Chiesa romanica a cinque navate con transetto a tre navate, iniziata nel 1064 e consacrata nel 1118. Il duomo venne ampliato nel corso del XII secolo ad opera dell'architetto Rainaldo a cui si deve anche la facciata.

OBIETTIVO

Realizzazione del modello 3D con *texture* fotografica ad alta risoluzione dell'esterno della cattedrale, finalizzato al monitoraggio, alla tutela ed al restauro.

KEYWORD

Laser scanner TOF, allineamento guidato dalla stazione totale integrata, modello 3D con *texture* fotografica ad alta risoluzione, integrazione del modello 3D con Sistemi Informativi.

STRUMENTI E METODO

– *Laser scanner* HDS 2500 (Leica Geosystems), sistema TOF ad impulsi:

precisione su singolo punto: (da 1,5 a 50m)	posizione	±6 mm,
	distanza	±4 mm,
	angolo orizzontale	±60 microradiani,
	angolo verticale	±60 microradiani;

dimensione dello *spot laser*: ≤ 6 mm (da 0 a 50 m);

campo visivo: 40°x40°;

range d'acquisizione: da 1,5 m a 50 m (portata efficace ottimale), massimo fino a 100 m;

velocità di scansione: fino a 1.000 punti/s;

peso: 20,5 kg.

– *Laser scanner* HDS 3000 (Leica Geosystems), sistema TOF ad impulsi:

precisione su singolo punto: (da 1 a 50m)	posizione	6 mm,
	distanza	4 mm,
	angolo orizzontale	60 microradiani,
	angolo verticale	60 microradiani;

dimensione dello <i>spot laser</i> :	≤ 6 mm (da 0 a 50 m);
campo visivo:	360°x270°;
<i>range</i> d'acquisizione:	da 1 m a 100 m (portata efficace ottimale);
velocità di scansione:	fino a 1.800punti/s;
sensore CCD della fotocamera:	1024x1024 pixel (alta risoluzione);
peso:	16 kg.
– <i>Stazione totale integrata Reflectorless</i>	Leica TCR1101 XR (Leica Geosystems):
precisione angolare:	0,3 milligon;
precisione sulle distanze:	3 mm + 2 ppm (tempo di misura di 3 s);
<i>range</i> di misura:	da 1,5 m a 80m (senza riflettore), fino a 5000 m con prisma circolare.

Il progetto ha portato alla scansione dei volumi esterni degli edifici di piazza dei Miracoli, utilizzando la tecnologia TOF ad impulsi, e alla modellazione tridimensionale dell'esterno del Duomo (2005); successivamente nel 2006, il modello è stato integrato con Sistemi Informativi, già esistenti o in corso di realizzazione, contenenti la documentazione storica e i materiali relativi al restauro. Per cui, il rilievo del Duomo e della Piazza si configura come un "sistema connettivo" che organizza le informazioni storiche, i dati di natura diagnostica, ..., restituendo un'istantanea dello stato attuale e di quello passato.

Sono state, inoltre, acquisite (e spalmate sul modello 3D) immagini digitali ad alta risoluzione di una parte del Duomo, costruendo un modello interrogabile che contiene, oltre alle informazioni morfologiche e metriche, anche quelle relative al colore e – quindi – all'aspetto superficiale (aspetto cromatico ed alterazioni, degrado, ...).

Anche in questo caso, il VCLab concepisce il modello come strumento d'indagine finalizzato alla documentazione, alla conservazione e al restauro (anche come simulazione di un cantiere virtuale), integrandolo con strutture dati esterne, al pari di quanto già sperimentato nei progetti *Michelangelo's David Restoration*, *Digital Minerva* e nella ricostruzione virtuale del sepolcro di Arrigo VII. Indicando come sottoprodotti potenziali le applicazioni di realtà virtuale per la divulgazione di massa da sfruttare in ambito museale.

La campagna di acquisizione dell'esterno del Duomo è stata fatta dal DIAPReM di Ferrara in collaborazione con il Dipartimento di Progettazione dell'Architettura di Firenze, con i due *laser scanner* TOF ad impulsi HDS 2500 e HDS 3000 della Leica Geosystems. Le singole *range map* sono state allineate su una serie di punti d'appoggio (*target*), battuti da una stazione totale integrata Reflectorless Leica TCR1101 XR e realizzando una poligonale d'appoggio per la georeferenziazione dei singoli *scanworld*. Sono stati effettuati 22 *scanworld* per un totale di 88.800.000 punti battuti dallo *scanner* HDS 2500 e 115.200.000 punti dallo *scanner* HDS 3000, con una

maglia di acquisizione dal passo teorico di 1x1cm, portandola a 0,6x0,6 cm per riuscire a catturare i particolari strutturali e decorativi della facciata e dell'abside. Per la fase di elaborazione dei dati (allineamento, fusione, *editing* e semplificazione) è stato impiegato *software* scritto dal VCLab (ISTI-CNR). In alcune scansioni è stato rilevato un errore di allineamento di parecchi centimetri da imputare al movimento accidentale dello *scanner* dopo la ripresa dei *target*. A questo inconveniente si è ovviato individuando le riprese non perfettamente allineate e registrandole, con il resto delle *range map* unite, tramite il software sviluppato da ISTI-CNR. La successiva fase di fusione delle singole "nuvole di punti" ha generato un modello poligonale (*mesh*) che descrive l'architettura non per punti, ma per mezzo di superfici triangolate che permettono una più semplice ed efficiente gestione delle operazioni di visualizzazione e di estrazione delle sezioni. La fase di fusione ha dato origine ad un unico modello 3D formato da 390 milioni di triangoli, senza elementi ridondanti e con risoluzione di 1cm. Un secondo modello è stato ottenuto utilizzando tecniche di interpolazione tra campioni basate sull'approccio *Moving Least Squares* (MLS). Questa tecnica invece di operare sulle *range map* come superfici considera i punti acquisiti dallo *scanner* e, localmente, calcola la superficie, permettendo di ottenere una migliore approssimazione dei punti acquisiti (anche in presenza di rumore o di non uniformità della griglia di scansione), che si riflette in un modello con un maggior livello di dettaglio ed un tempo di elaborazione minore. Per il modello 3D del Duomo (400 milioni di triangoli, con risoluzione di 1cm) ottenuto con questo metodo, è stato necessario metà del tempo impiegato per il modello a 390 milioni di triangoli precedentemente citato.

Il modello ottenuto al termine del processo di fusione ad elevato livello di dettaglio ma difficilmente gestibile (visualizzazione, manipolazione, ...) data l'enorme mole di triangoli che lo definisce. Si rende necessario un'efficace fase di semplificazione controllata del numero di vertici e di triangoli, che porta ad una diminuzione della quantità delle informazioni, allontanando il modello poligonale dall'architettura acquisita. Il *software* di semplificazione sviluppato da ISTI-CNR non produce un modello 3D caratterizzato da un determinato livello di precisione, ma una struttura dati che lo descrive a differenti livelli di dettaglio. Le singole strutture dati, ognuna preposta a rappresentare il modello alla risoluzione scelta, vengono visualizzate in maniera interattiva mediante il *Virtual Inspector* (altro *software* del ISTI-CNR): scegliendo un determinato punto di vista, il sistema propone un modello a differente risoluzione, caratterizzato da un elevato dettaglio nelle zone più prossime all'osservatore virtuale che va a decrescere man mano che ci si allontana da esso. Tale *software* dà la possibilità, anche a computer a basso costo e con limitate prestazioni, di visualizzare un modello 3D ad elevata risoluzione.

RISOLUZIONE

passo di campionamento	generale:	1x1 cm;
	particolari strutturali e decorativi (della facciata e dell'abside):	0,6x0,6 cm.

SOFTWARE

Software non commerciale sviluppato da ISTI-CNR.

PRODOTTI

Modello poligonale 3D (*mesh*) dell'esterno del Duomo; *mesh* parziali con *texture* fotografica ad alta risoluzione; una struttura dati formata dal modello 3D dell'esterno del Duomo, integrato con Sistemi Informativi contenenti la documentazione storica e i materiali relativi al restauro.

PUBBLICAZIONI

M. BALZANI, F. UCCELLI, R. SCOPIGNO, C. MONTANI, *La Cattedrale di Pisa nella Piazza dei Miracoli: un rilievo 3D per l'integrazione con i sistemi informativi di documentazione storica e di restauro*, Restauro 2006: Salone dell'Arte del Restauro e della Conservazione dei Beni Culturali e Ambientali, Acropoli srl, 2006.

M. BALZANI, F. UCCELLI, R. SCOPIGNO, C. MONTANI, *La Cattedrale di Pisa: Un rilievo 3D per l'integrazione con i sistemi informativi di documentazione storica e di restauro*, in "Architetti: Idee, Cultura e Progetto", n. 6-7/2006, pp. 10-11.

A. SPINELLI, F. GANOVELLI, C. MONTANI, R. SCOPIGNO, *Recovering 3D Architectural Information from Dense Digital Models of Buildings*, Fourth Eurographics Italian Chapter 2006, pp. 177-182.

SITOGRAFIA

Home page del DIAPReM, Università di Ferrara;

<http://www.unife.it/centri/diaprem>. (consultato il 14-8-2011)

Home page del "Digital Cathedral of Pisa" (Visual Computing Lab);

http://vcg.isti.cnr.it/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=87&Itemid=27.

(consultato il 5-9-2009)

Home page del Visual Computing Lab (ISTI-CNR, Pisa);

<http://vcg.isti.cnr.it>. (consultato il 5-9-2009)

Sito con informazioni sulle attività, le pubblicazioni, i progetti e le persone del Visual Computing Lab (ISTI-CNR, Pisa);

<http://vcg.isti.cnr.it/publications/publications.htm>. (consultato il 5-9-2009)

IL COMPLESSO ARCHITETTONICO DEL PATIRION (ROSSANO, COSENZA)

5

UNITÀ DI RICERCA

Laboratorio di Rilievo e Progettazione-Università della Calabria. (A. De Sanctis, G. Fortunato, A. Lio, A. Zappani).

ANNO

2006.

DESCRIZIONE

Il rilievo della chiesa e del complesso religioso del Patirion è stato commissionato dalla Soprintendenza per i Beni Architettonici e per il Paesaggio per la Calabria, al fine di promuovere una campagna di studio, finalizzata alla documentazione e al restauro del monumento.

Il complesso monastico del Patirion venne fondato agli inizi del XII secolo (tra il 1101 e il 1105, secondo Paolo Orsi) dal monaco basiliano San Bartolomeo di Simeri. Il monastero è il risultato di stratificazioni storiche e rimaneggiamenti, tra le quali menzioniamo il restauro della chiesa e del chiostro (1762) voluto dall'allora abate commendatario, il cardinale Carlo Barberini. Attualmente poco resta dell'originario monastero basiliano: buona parte è allo stato di rudere, mentre il resto ha subito pesanti interventi nel corso dei secoli. La parte del complesso meglio conservata è la chiesa. Una basilica a tre navate orientata, approssimativamente, lungo la direttrice est-ovest con tre absidi in stile arabo-normanno, impreziosita dal pavimento musivo.

OBIETTIVO

Definizione di un metodo di rilevamento con *laser scanner* TOF ad impulsi, efficiente dal punto di vista dei tempi e dei risultati ottenuti (in termini di elaborati grafici); integrazione tra rilevamento con *laser scanner* 3D e rilevamento "tradizionale" (metodo diretto, strumentale e fotogrammetria da singoli elementi); sperimentazione di nuove possibilità analitiche rese possibili dalla nuvola di punti (discreto/continuo, modello, ...).

KEYWORD

Laser scanner TOF ad impulsi, allineamento guidato dalla stazione totale integrata, integrazione tra rilevamento "tradizionale" e rilevamento con il *laser scanner* 3D, documentazione per il restauro.

STRUMENTI E METODO

- *Laser scanner* HDS 3000 (Leica Geosystems), sistema TOF ad impulsi:
 precisione su singolo punto: posizione 6 mm,

(da 1 a 50m)	distanza	4 mm,
	angolo orizzontale	60 microradiani,
	angolo verticale	60 microradiani;
dimensione dello <i>spot laser</i> :		≤ 6 mm (da 0 a 50 m);
campo visivo:		360°x270°;
<i>range</i> d'acquisizione:		da 1 m a 100 m (portata efficace ottimale);
velocità di scansione:		fino a 1.800 punti/s;
sensore CCD della fotocamera:		1024x1024 pixel (alta risoluzione);
peso:		16 kg.
– <i>Stazione totale integrata</i> Leica TCR407p (Leica Geosystems):		
	precisione angolare:	2 milligon;
	precisione sulle distanze:	3 mm + 2 ppm (RL/visibile);
	<i>range</i> di misura:	da 1,5 m a 300 m (senza riflettore, su piastra segnale).

Per rilevare del complesso architettonico del Patirion è stato usato prevalentemente il *laser scanner* 3D TOF ad impulsi (Leica HDS 3000) integrato, ove necessario, con metodi e strumenti tradizionali (stazione totale Leica TCR 407p, fotogrammetria da singoli elementi, ...). La fase di acquisizione (2006) ha dato luogo ad un modello digitale dell'intero complesso e del suo immediato intorno, eccezion fatta per gli ambienti di modeste dimensioni e per quelli oggetto di restauro, rilevati con la già citata stazione totale e con il metodo diretto¹.

Nella tabella (1) sono riportati, per ogni edificio, il metodo e gli strumenti utilizzati, specificando se gli elaborati sono stati realizzati partendo dalla nuvola di punti o da dati ottenuti con altri strumenti.

Gli edifici sono stati ripresi con un passo teorico di 1x1 cm, arrivando fino a 0,5x0,5 cm nella scansione dei particolari; mentre per il terreno circostante è stata usata una "maglia" (sempre teorica) variabile tra 3x3 cm e 5x5 cm. Gli *scanworld* (in totale 45) sono stati allineati mediante una serie di *target* battuti da una poligonale d'appoggio chiusa realizzata con la stazione totale Leica TCR 407p e successivamente usando il *software* Cyclone 5.2 della Leica, raggiungendo un errore di allineamento massimo pari a 6 mm, sull'intera area del complesso (circa 8.500 mq).

Le singole piante (e quindi la configurazione planimetrica generale), l'assetto d'insieme dei prospetti e le sezioni sono state ricavate dal modello numerico (nuvola di punti). La pianta dei tetti dei differenti edifici è stata ottenuta con l'uso combinato del *laser scanner*, della stazione totale e di foto aeree. La consistenza materica dei prospetti è stata disegnata sia sulla base di immagini raddrizzate ottenute dalle nuvole di punti, che da foto raddrizzate.

edificio	interno	esterno	metodo
CHIESA	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti.	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D, fotogrammetria da singoli elementi; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti e da foto raddrizzate.	strumentale su base di appoggio chiusa (integrato parzialmente con il metodo diretto).
RUDERI DELLE CELLE	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti.	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti.	strumentale su base di appoggio chiusa (integrato parzialmente con il metodo diretto).
CAMPANILE	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti.	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti.	strumentale su base di appoggio chiusa (integrato parzialmente con il metodo diretto).
EDIFICIO NORD (COMPRESI I GIARDINI RIALZATI)	<i>acquisizione:</i> stazione totale; <i>elaborati:</i> ottenuti con misure battute con la stazione totale.	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti.	strumentale su base di appoggio chiusa (integrato parzialmente con il metodo diretto).
EDIFICIO OVEST	<i>acquisizione:</i> stazione totale; <i>elaborati:</i> ottenuti da misure battute con la stazione totale.	<i>acquisizione:</i> laser scanner 3D; <i>elaborati:</i> ottenuti da nuvole di punti.	strumentale su base di appoggio chiusa (integrato parzialmente con il metodo diretto).
AREA CIRCOSTANTE GLI EDIFICI	rilievo eseguito con laser scanner 3D integrato con metodi tradizionali (stazione totale).		

Tab. 1 – *Metodo e strumenti utilizzati nel rilevamento.*

Operativamente, per passare dal modello numerico a quello poligonale piano, sono stati definiti i profili individuando quelle sezioni caratteristiche che sono alla base degli elaborati realizzati (piante, prospetti e sezioni) segmentando, tramite l'applicativo Leica Cloudworks per Autocad, la nuvola di punti in spessori sottili ed interpolando linearmente per ottenerne le forme. Nel definire questi "protoelaborati"² non si è tenuto in alcun conto la scala e/o l'incertezza dell'elaborato finale, ma si è cercato di ritenere tutte le informazioni metriche offerte dalla discretizzazione per punti, senza dare luogo a scollamenti eccessivi dal modello numerico e conseguente perdita di informazioni³.

I criteri guida di queste prime operazioni sono da ricercare in una giusta *ratio* tra efficienza (in termini di tempo impiegato e risultati raggiunti) e qualità, sia morfologica che metrica nell'aderenza al modello numerico, intesa come limitazione della soggettività che elaborazioni di tal genere inducono.

Ad un grado di codifica più sofisticato appartiene il passaggio dal modello poligonale piano⁴ ottenuto dalla nuvola di punti (i "protoelaborati" di cui sopra) al modello geometrico utilizzato per la restituzione. In questo passaggio, accanto al criterio di qualità metrica, intervengono istanze di tipo "filologico": non tutte le primitive geometriche possono essere usate per descrivere una forma architettonica, ma solamente quelle conosciute e adoperate nel periodo storico a cui appartiene l'opera o la parte analizzata⁵.

Il valore della scala di rappresentazione, trascurato nella definizione dei "protoelaborati"⁶, viene ristabilito con la codifica di questi ultimi attraverso modelli geometrici con diverso grado di approssimazione metrico, morfologico e percettivo al dato reale. Questi tre fattori, di cui la scala metrica è portatrice, sono regolati dall'introduzione di *soglie di restituzione* che definiscono livelli di somiglianza via via crescenti con la situazione reale al diminuire del fattore di scala e, quindi, all'aumentare del dettaglio nella restituzione.

RISOLUZIONE

Edifici	passo di campionamento:	1x1 cm;
	passo di campionamento:	0,5x0,5 cm (particolari);
Area circostante gli edifici	passo di campionamento:	3x3 cm e 5x5 cm.

SOFTWARE

Leica Cyclone 5.2 (allineamento degli *scanworld*, viste e immagini raddrizzate delle "nuvole di punti");

Leica CloudWorks (applicativo per Autocad)

Autodesk Autocad 2004;

Polyworks™ Modeler (*meshing*).

PRODOTTI

Nuvola di punti dell'intero complesso e dell'area circostante; modello poligonale 3D (*mesh*) dell'esterno delle absidi; dalla nuvola di punti sono stati ottenuti elaborati grafici bidimensionali (immagini raddrizzate, piante, prospetti e sezioni) e tridimensionali (viste prospettiche e assonometrie sezionate); visite virtuali desunte dal modello numerico; dalla *mesh* sono state dedotte le curve di livello della zona absidale;

PUBBLICAZIONI

A. LIO, *Il complesso architettonico del Patirion (ROSSANO CS). Metodologia, integrazione ed ottimizzazione tra i nuovi strumenti per il rilievo*, in Atti del "XXX

Convegno Internazionale delle Discipline della Rappresentazione (U.I.D.)-Un disegno lungo trenta anni”, Lerici (La Spezia), 2-4 ottobre 2008, Graphic Sector Editore, Genova, 2009.

A. ZAPPANI, *Modifiche indotte dal laser scanner 3D nel rilevamento architettonico*, in Atti del “XXX Convegno Internazionale delle Discipline della Rappresentazione (U.I.D.)-Un disegno lungo trenta anni”, Lerici (La Spezia), 2-4 ottobre 2008, Graphic Sector Editore, Genova, 2009, pp. 68-77.

A. ZAPPANI (in collaborazione con A. De Sanctis, G. Fortunato e A. Lio), pannelli realizzati per la mostra celebrativa del XXX Convegno Internazionale dell’U.I.D. (Lerici, 2-4 ottobre 2008). Inoltre, i pannelli sono stati pubblicati in *Rappresentazione dalla formazione alla professione* a cura di Renata Bizzotto, Carlo Mezzetti e Nicolò Sardo, Edizioni Kappa, Roma 2009.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

A. DE SANCTIS, *Modalità di analisi obiettivi e restituzioni nel rilevamento architettonico*, in Atti del “XXX Convegno Internazionale delle Discipline della Rappresentazione (U.I.D.)-Un disegno lungo trenta anni”, Lerici (La Spezia), 2-4 ottobre 2008, Graphic Sector Editore, Genova, 2009.

¹ Il rilievo è stato orientato e georeferenziato riferendolo al sistema di riferimento UTM WGS 84. L’orientamento è stato effettuato con stazione GPS *Trimble* doppia frequenza, mentre per l’elaborazione in *post-processing* sono stati usati i dati della stazione permanente di Nocera, ottenendo una precisione di posizionamento pari a ± 30 cm.

² Con “protoelaborato” si intende una spezzata formata da segmenti di retta consecutivi a definire un profilo che verrà, successivamente, approssimato con rette, spezzate o curve all’atto definizione del modello geometrico (e, quindi, della scala di rappresentazione).

³ Nel caso del Patirion (e come spesso accade in architettura) non è stato possibile creare un unico modello poligonale dell’intero monumento. Le difficoltà sono state essenzialmente di ordine pratico: l’impossibilità di gestire, da parte degli attuali *software*, l’enorme mole di dati; la difficoltà, da parte dell’operatore, di un controllo efficace e puntuale della qualità della *mesh* ottenuta. D’altro canto, un modello poligonale di tutto il complesso (o di una parte consistente di esso) con un elevato grado di aderenza al dato numerico sarebbe stato pressoché inutile per la ricerca delle sezioni caratteristiche. Si è dimostrata più efficace (dal punto di vista dei tempi, della fattibilità *hardware* e *software*, delle possibilità di verifiche *in itinere* del processo e di controllo della qualità dei risultati) la segmentazione della nuvola di punti prefissata in

funzione dell'elaborato finale desiderato, dalla quale ottenere in maniera automatica o semiautomatica i "protoelaborati" che sono alla base della definizione del modello geometrico.

⁴ Il modello poligonale piano serve da supporto per la definizione di quello geometrico, presentandosi come uno "stadio" intermedio che nasce da esigenze operative (controllo quantitativo del processo che porta alla definizione del modello geometrico) piuttosto che essere un prodotto finale del rilievo.

⁵ Tale ragionamento è stato applicato a tutte le superficie curve del Patirion.

⁶ I "protoelaborati" sono costruiti in modo da ottenere un'approssimazione morfologica e metrica della nuvola di punti qualitativamente e quantitativamente elevata in tempi ragionevolmente contenuti, avendo come obiettivo un basso livello di soggettività, tanto da poter essere usati come base da cui differenziare tutte le scale di rappresentazione. Per ottenere tale risultato è essenziale che le operazioni vengano condotte non tenendo conto del rapporto di scala ma solo dell'aderenza ai dati reali.

UNITÀ DI RICERCA

NRC Canada, ETH (Zurigo). (J.-A. Beraldin, S. F. El-Hakim, F. Remondino et al.).

ANNO

2007-2008¹.

DESCRIZIONE

L'Eretteo è un tempio ionico del V secolo a.C. realizzato in marmo pentelico dall'architetto Filocle. L'edificio, asimmetrico, si presenta con una configurazione planimetrica ed altimetrica irregolare, disponendosi su più livelli per mantenere luoghi di culto esistenti all'atto della sua costruzione. Il corpo rettangolare anfiprostilo è suddiviso in due celle, una dedicata ad Atena, l'altra a Poseidone Eretteo. A questo elemento principale sono aggregati: la loggia delle Cariatidi (a sud) e un portico (a nord).

OBIETTIVO

Realizzazione di un modello tridimensionale con *texture* fotografica ad alta risoluzione.

KEYWORD

Laser scanner TOF phase-shift, laser scanner TOF ad impulsi, fotogrammetria digitale, integrazione di tecniche attive e passive, modello 3D con texture fotografica ad alta risoluzione, GIS, realtà virtuale.

STRUMENTI E METODO

- *Laser scanner Surphaser® 25HSX* (MD3D Ltd.), sistema *phase-shift*:

incertezza lungo z (1 sigma) ² :	0,2 mm (10 m, 80% di riflettività), 0,7 mm (10 m, 20% di riflettività);
incertezza lungo z (1 sigma) ³ :	inferiore a 0,1 mm (10 m, 80% di riflettività), 0,3 mm (10 m, 20% di riflettività);
precisione sulla distanza:	0,001 mm;
precisione angolare:	8 arcsec (sia in orizzontale che in verticale);
dimensione dello <i>spot laser</i> :	5 mm (a 10 m), 10 mm (a 20 m);
campo visivo:	360°x270°;
<i>range</i> d'acquisizione:	da 1,2 m a 20 m (portata efficace ottimale);
<i>range</i> d'ambiguità:	27 m;
velocità di scansione:	190.000 punti/s;
peso:	9 kg.

- *Laser scanner* HDS 3000 (Leica Geosystems), sistema TOF ad impulsi:

precisione su singolo punto:	posizione	6 mm,
(da 1 a 50 m)	distanza	4 mm,
	angolo orizzontale	60 microradiani,
	angolo verticale	60 microradiani;
dimensione dello <i>spot laser</i> :	≤ 6 mm (da 0 a 50 m);	
campo visivo:	360°x270°;	
<i>range</i> d’acquisizione:	da 1 m a 100 m (portata efficace ottimale);	
velocità di scansione:	fino a 1.800 punti/s;	
sensore CCD della fotocamera:	1024x1024 pixel (alta risoluzione);	
peso:	16 kg.	
- *Fotogrammetria digitale*:
 - fotocamera: Canon EOS 5D (sensore: 12 Mpixel, obiettivo: 24 mm);
 - Mamiya ZD Digital Back (sensore: 22 Mpixel, obiettivo: 45 mm);
 - iWitness (Photometrix).

La modellazione dell’Eretteo è parte di un più articolato progetto da titolo “*Development of Geographic Information Systems at the Acropolis of Athens*” (giugno 2007-fine 2009), finanziato dall’Unione Europea e dal Governo Greco⁴. Tale progetto prevede (oltre alla realizzazione del modello tridimensionale dell’Eretteo): la definizione di una rete topografica; la realizzazione delle ortofoto delle facciate nord, est ed ovest delle mura dell’Acropoli in scala 1:50, mentre per le parti di mura con elementi architettonici significativi (definite nel progetto, aree di interesse speciale) sono previste ortofoto in scala 1:25; la produzione di ortofoto zenitali dell’Acropoli in scala 1:100; la costruzione di un sistema GIS basato sulle ortofoto e finalizzato alla documentazione ed il restauro; ed infine collegare il GIS ad un *database* esterno e pubblicarlo su *internet*.

La complessità della struttura ha reso necessario l’uso di differenti tecniche e strumenti, integrando tecniche *image-based* e *range-based* e sfruttando efficacemente le potenzialità di entrambi i tipi di approccio. Sono stati usati: un *laser scanner* TOF a differenza di fase ad elevata precisione ma con un *range* d’acquisizione limitato; un *laser scanner* TOF ad impulsi, caratterizzato da una precisione inferiore rispetto al precedente ma con una portata elevata; tecniche di fotogrammetria digitale (*image-based modeling*, IBM) per le aree non raggiungibili dai *laser*, mentre per la parte superiore del tempio e per l’intorno ci si è avvalsi di un pallone aerostatico.

Pertanto è stata necessaria una significativa pianificazione della campagna d’acquisizione, che si è concretizzata con lo scegliere il tipo di strumento, stabilire la griglia d’acquisizione, l’incertezza e stimando i tempi necessari.

Operativamente, la configurazione articolata della pianta, la morfologia del terreno e la vicinanza di alberi ha determinato delle lacune nelle nuvole di punti, dilatando i tempi di scansione (5 giorni). A queste difficoltà, va anche aggiunta quella dovuta alla presenza di marmi differenti, conseguenza di passati restauri, e i depositi superficiali. Le caratteristiche della superficie del marmo, l'erosione della superficie (non uniforme, poiché messi in opera in tempi diversi) e i depositi distribuiti in maniera disomogenea, non hanno permesso la completa correzione dell'effetto *laser speckle*.

La maggior parte del monumento è stato scandito con il *laser scanner* Surphaser® 25HSX, sistema basato sulla stima indiretta del tempo di volo, che usa una radiazione luminosa continua (CW, *continuous wave*) modulata in intensità. Tale *laser* è in grado di acquisire, ad una distanza di 5 m, mantenendo una deviazione standard di 0,25 mm e una precisione inferiore a 1 mm (errore massimo)⁵. Per la parte superiore della loggia delle Cariatidi, non raggiungibile dal Surphaser poiché fuori da suo *range* di misura, è stato usato un *laser scanner* TOF ad impulsi HDS 3000 della Leica Geosystems.

Successivamente, le singole nuvole di punti sono state “pulite” e registrate, eseguendo un primo allineamento mediante punti comuni a due scansioni adiacenti, e – successivamente – usando la tecnica ICP (*Iterative Closet Point*) per ottenere un più preciso allineamento. Infine, è stato fatto un allineamento globale per minimizzare gli errori residui e per distribuirli uniformemente. Il primo allineamento, eseguito durante la scansione, ha permesso di ottimizzare i tempi morti e controllare la presenza di eventuali “buchi”, prima di passare alla stazione successiva. Al termine della fase di registrazione, si è operata la fusione delle immagini 3D registrate, eliminando i punti ridondanti presenti nelle zone di sovrapposizione tra scansioni differenti e ricostruendo una *mesh* dell'edificio che approssima al meglio la superficie reale. La successiva fase di *editing* della *mesh* si è resa necessaria per chiudere le lacune e correggere gli errori topologici.

Per l'acquisizione della *texture* è stata usata una fotocamera Canon EOS 5D con risoluzione di 12 Mpixel, con la quale sono state acquisite immagini HDR, che sono state “spalmate” sul modello digitale avvalendosi dei punti omologhi tra questo e le immagini.

I modelli poligonali (*mesh*) della roccia, delle mura e dell'Eretteo sono stati ottenuti da una scansione *laser*, con risoluzione di 1 cm per le zone di particolare interesse (cioè quelle parti di mura in cui vi sono elementi architettonici significativi), mentre si è usata una maglia di 5 cm per il resto delle mura. L'Eretteo è stato scandito utilizzando un griglia di 0,5 cm (escluse le Cariatidi).

Sono stati realizzati due modelli poligonali: il primo, di 10 milioni di poligoni con una risoluzione laterale di 15 mm, mentre il secondo ad alta risoluzione è formato da circa 400 milioni di poligoni.

La penetrazione nel marmo del raggio *laser* è stata valutata utilizzando, sia il solo Surphaser (metodo *range-based*), che confrontando la nuvola di punti acquisita da questo strumento con quella ottenuta da tecniche *image-based*. Nel primo caso è stato utilizzato l'espedito di scandire un foglio bianco di carta appoggiato alla parete in questione, successivamente si è costruito il piano che meglio approssimava il foglio di carta al fine di confrontare lo scarto tra questo e i punti scanditi ed ottenendo un valore medio di circa 5 mm. Nel secondo caso, sono state scelte differenti aree dell'Eretteo caratterizzate da marmi messi in opera in epoche differenti, e comparando la nuvola di punti di una medesima porzione raffrontando il metodo *range-based* con quello *image-based* è stato trovato (sia con la Canon che con la Mamiya) un valore medio di 3 mm.

Le immagini usate per la fotogrammetria digitale sono state acquisite con la fotocamera Canon EOS 5D (la stessa utilizzata per la *texture*), mentre per le immagini catturate dal pallone aerostatico è stata utilizzata una Mamiya ZD Digital Back con sensore da 22 Mpixel.

L'Eretteo è stato anche modellato con tecniche di *image-based modeling* e confrontato con il modello poligonale ricavato dalla scansione con *laser scanner*, registrando una deviazione standard delle differenze tra i due di 1,4 mm.

RISOLUZIONE

Eretteo	risoluzione spaziale: 0,5 cm o superiore;
mura	risoluzione spaziale: 1 cm (aree di particolare interesse);
	risoluzione spaziale: 5 cm (per il resto delle mura).

SOFTWARE

Polyworks™ Modeler (*align, merge, edit, compress*);

Atelier 3D (*rendering*);

iWitness (precalibrazione).

PRODOTTI

Modelli poligonali 3D (*mesh*) con differenti livelli di dettaglio, con e senza *texture* fotografica ad alta risoluzione.

PUBBLICAZIONI

G. GUIDI, M. RUSSO, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, Milano McGraw-Hill, 2010, pp. 440-442.

S. F. EL-HAKIM, J.-A. BERARDIN, F. REMONDINO, M. PICARD, L. COURNOYER, M. BALTSAVIAS, *Using Terrestrial Laser Scanning and Digital Images for 3D Modeling of the Erechteion, Acropolis of Athens*, in Proceedings of "Digital Media and its Applications in Cultural Heritage" (DMACH 2008), 3-6 novembre 2008.

S. F. EL-HAKIM, J.-A. BERARDIN, M. PICARD, L. COURNOYER, *Surface Reconstruction of Large Complex Structures from Mixed Range Data-The Erechtheion Experience*, in Proceedings of "XXI Congress The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing" (ISPRS 2008), Beijing (China), Vol. 37, Part B1, 3-11 luglio 2008.

D. MOULLOU, D. MAVROMATI, V. TSINGAS, C. LIAPAKIS, L. GRAMMATIKOPOULOS, S. RAIKOS, A. SARRIS, E. BALTSAVIAS, F. REMONDINO, J.-A. BERARDIN, S. F. EL-HAKIM, L. COURNOYER, M. PICARD, *Recording, Modeling, Visualisation and Gis Applications Development for the Acropolis of Athens*, in Proceedings of "XXI Congress The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing" (ISPRS 2008), Beijing (China), Vol. 37, Part B5, 3-11 luglio 2008

F. REMONDINO, S. F. EL-HAKIM, E. BALTSAVIAS, M. PICARD, L. GRAMMATIKOPOULOS, *Image-Based 3d Modeling of the Erechtheion, Acropolis of Athens*, in Proceedings of "XXI Congress The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing" (ISPRS 2008), Beijing (China), Vol. 37, Part B5, 3-11 luglio 2008.

V. TSINGAS, C. LIAPAKIS, V. XYLIA, D. MAVROMATI, D. MOULLOU, L. GRAMMATIKOPOULOS, C. STENTOUMIS, *3D modelling of the Acropolis of Athens using balloon images and terrestrial laser scanning*, in Proceedings of "XXI Congress The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing" (ISPRS 2008), Beijing (China), Vol. 37, Part B1, 3-11 luglio 2008.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

P. BLOMERUS, A. LESK, *Using AutoCAD to Construct a 4D Block-by-Block Model of the Erechtheion on the Akropolis at Athens, III: An interactive virtual-reality database*, in "CSA Newsletter", Vol. XXII, n. 1/2009.

P. BLOMERUS, A. LESK, *Using AutoCAD to Construct a 4D Block-by-Block Model of the Erechtheion on the Akropolis at Athens, II: Connecting a Database to an AutoCAD Model*, in "CSA Newsletter", Vol. XX, n. 3/2008.

P. BLOMERUS, A. LESK, *Using AutoCAD to Construct a 4D Block-by-Block Model of the Erechtheion on the Akropolis at Athens, I: Modeling the Erechtheion in Four Dimensions*, in "CSA Newsletter", Vol. XX, n. 2/2007.

D. MOULLOU, D. MAVROMATI, *Topographic and photogrammetric recording of the Acropolis of Athens*, in Proceedings of "XXI International CIPA Symposium", Atene (Grecia), 1-6 ottobre 2007.

M. CALLIERI, P. DEBEVEC, J. PAIR, R. SCOPIGNO, *A realtime immersive application with realistic lighting: the Parthenon*, in "Computer & Graphics", Vol. 30, n. 3/2006, pp. 368-376.

P. DEBEVEC, *Making "The Parthenon"*, in Proceedings of "VI International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage" (VAST 2005), Pisa (Italia), 8-11 novembre 2005.

J. STUMPFEL, C. TCHOU, N. YUN, P. MARTINEZ, T. HAWKINS, A. JONES, B. EMERSON, P. DEBEVEC, *Digital reunification of the Parthenon and its sculptures*, in Proceedings of

“IV International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage” (VAST 2003), Brighton (Regno Unito), 5-7 novembre 2003, pp. 41-50.

SITOGRAFIA

Pagina internet del NRC Canada relativa a “*the Erechtheion project*”;

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/iit/about/erechtheion.html> (consultato il 4-9-2011)

Pagina internet di GIM International con un articolo di J.-A. Beraldin “*Modelling the Erechtheion*” (4-12-2009);

http://www.gim-international.com/issues/articles/id1441-Modelling_the_Erechtheion.html (consultato il 4-9-2011)

Home page del “*The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*” (ISPRS);

<http://www.isprs.org/society/congress.aspx>. (consultato il 27-8-2009)

Home page del “*CSA Newsletter*” dove è possibile trovare gli articoli di P. BLOMERUS e A. LESK;

<http://csanet.org/newsletter/fall07/nlf0701.html>. (consultato il 27-8-2009)

¹ Le date sono riferite all’inizio ed alla fine del progetto “*Development of Geographic Information Systems at the Acropolis of Athens*”, mentre per la scansione dell’Eretteo con i *laser scanner* sono stati necessari solo 5 giorni.

² Valori relativi a *Range Data Single Pass Mode*.

³ Valori relativi a *Range Data 2-Pass Mode*.

⁴ Precedenti progetti sull’Acropoli hanno portato alla modellazione di strutture, statue, ..., e per un loro approfondimento si rimanda alle pubblicazioni riportate nel campo PUBBLICAZIONI CORRELATE. Ricordiamo, tra tutti, l’animazione “*The Parthenon*” (2004) di Paul Debevec, in cui è stato ricostruito il tempio con le sue sculture disperse in vari musei, usando *laser scanner 3D*, *range camera* a luce strutturata e fotogrammetria digitale (<http://ict.debevec.org/~debevec/Parthenon/film.html>).

⁵ Per raggiungere questa precisione, sono stati corretti gli errori di penetrazione nel marmo che risultano essere di circa 5 mm.

IL FORO CIVILE DI POMPEI

7

UNITÀ DI RICERCA

Scuola Nazionale Superiore (SNS) di Pisa; Soprintendenza Archeologica di Pompei (SAP); Dipartimento INDACO, Politecnico di Milano; Fondazione Bruno Kessler, Trento. (M. Gaiani, G. Guidi, F. Remondino et al.)

ANNO

2007-2008.

DESCRIZIONE

Il Foro Civile di Pompei rappresentava il centro dell'attività politica, religiosa ed economica della città. L'assetto funzionale, organizzativo e formale della piazza e degli edifici è l'esito delle modifiche e dei cambiamenti, che si sono stratificati nel corso del tempo. A partire dall'originaria configurazione, tra il II ed il I secolo a.C., l'area del foro venne ampliata: si costruirono parte degli edifici pubblici e venne sostituita la pavimentazione in tufo con una in travertino, pervenendo all'aspetto definitivo, che conservò fino all'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.

La piazza, di forma rettangolare (143x38 m) con l'asse maggiore disposto – approssimativamente – lungo la direttrice nord-sud, era chiusa a nord dal Tempio di Giove, mentre gli altri tre lati erano circondati da un colonnato a due ordini. Il tempio di Giove era affiancato da due archi monumentali di accesso alla piazza. Lungo il perimetro di quest'ultima, oltre il colonnato, erano distribuiti gli edifici pubblici.

Sul lato rivolto ad est si affacciavano: il *Macellum*, il Santuario dei Lari Pubblici, il Tempio di Vespasiano, l'edificio di Eumachia e il *Comitium*. Sul lato ovest vi erano: il Tempio di Apollo (disposto lungo la direttrice nord-sud, ma leggermente inclinato rispetto alla piazza), la Basilica (collocata perpendicolarmente alla piazza) e un'altra costruzione, più piccola rispetto alle altre due, forse il *forum olitorium*. Il lato meridionale era destinato a tre strutture con funzioni politiche (la Curia, l'ufficio degli edili e quello dei duoviri).

OBIETTIVO

Realizzazione di modelli geometrici multi-risoluzione mappati con *texture* fotografica ad alta risoluzione; messa a punto di protocolli operativi per l'acquisizione dei dati e la modellazione tridimensionale di un sito archeologico esteso e complesso, integrando efficacemente le tecniche attive e passive, per raggiungere il compromesso migliore tra la precisione dei modelli geometrici, l'oggetto scandito e la scala della rappresentazione.

KEYWORD

Laser scanner TOF phase-shift, laser scanner TOF ad impulsi, fotogrammetria digitale, integrazione di tecniche attive e passive, modelli 3D con differenti livelli di dettaglio e con texture fotografica ad alta risoluzione, modellazione “semantica”, 3D GIS, realtà virtuale.

STRUMENTI E METODO

- *Laser scanner HDS 6000 (Leica Geosystems), sistema phase-shift:*

precisione su singole misure:	posizione	6 mm (da 1 a 25 m), 10 mm (fino a 50 m),
	distanza	$\leq 4\text{mm}$ (albedo: 90%, fino a 25 m), $\leq 5\text{mm}$ (albedo: 18%, fino a 25 m), $\leq 5\text{mm}$ (albedo: 90%, fino a 50 m), $\leq 6\text{mm}$ (albedo: 18%, fino a 50 m),
	angolo orizzontale	125 microradianti,
	angolo verticale	125 microradianti;
dimensione dello <i>spot laser</i> :		3 mm in uscita (definizione di Gauss) +divergenza di 0,22 mrad 8 mm a 25 m, 14 mm a 50 m;
campo visivo:		$360^\circ \times 310^\circ$;
<i>range</i> d’acquisizione:	intervallo di ambiguità di 79 m (con albedo del 90%),	50 m (con albedo del 18%);
velocità di scansione:		fino a 500.000 punti/s;
sensore CCD della fotocamera:		non è presente la fotocamera;
Capacità memoria dati (<i>onboard</i>):		60 GB minimo;
peso:		14 kg (compresa la batteria integrata).
- *Laser scanner HDS 3000 (Leica Geosystems), sistema TOF ad impulsi:*

precisione su singolo punto: (da 1 a 50 m)	posizione	6 mm,
	distanza	4 mm,
	angolo orizzontale	60 microradianti,
	angolo verticale	60 microradianti;
dimensione dello <i>spot laser</i> :		$\leq 6\text{ mm}$ (da 0 a 50 m);
campo visivo:		$360^\circ \times 270^\circ$;
<i>range</i> d’acquisizione:		da 1 m a 100 m (portata efficace ottimale);
velocità di scansione:		fino a 1.800 punti/s;
sensore CCD della fotocamera:		1024x1024 pixel (alta risoluzione);
peso:		16 kg;
- *Fotogrammetria digitale:*

fotocamera:	Canon EOS 10D (24-50 mm) con sensore da 6,3 Mpixel,
-------------	---

Canon EOS 20D (20-50 mm) con sensore da 8,2 Mpixel,
Nikon D300 (20 mm) con sensore da 12,3 Mpixel,
Kodak DCS Pro (50 mm) con sensore da 12 Mpixel,
Zeiss RMK A 30/23 (Aerial Film Camera).

Il rilievo e la modellazione del Foro Civile di Pompei fa parte del più ampio “Progetto Pompei”, finanziato da ARCUS S.p.a. e nato dalla cooperazione tra la Soprintendenza Archeologica di Pompei, la Scuola Normale Superiore di Pisa e il Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano¹.

La prima fase di questo progetto (2005-‘08) si è conclusa con la realizzazione di un sistema informativo *web-based*, progettato dalla SNS e sviluppato dalla società Liberologico, per l’organizzazione e la gestione di risorse digitali relative all’area del Vesuvio.

La seconda, iniziata nel maggio 2007 e terminata nell’ottobre 2008, si è articolata in due parti:

- la costruzione di un sito *web* per la divulgazione di studi e risorse relativi al patrimonio archeologico vesuviano, nonché la realizzazione di un’applicazione per la distribuzione di contenuti culturali su GSM, GPRS e Palmari;
- la modellazione dell’intero Foro, compresi i reperti presenti al suo interno e i ruderi delle facciate che affacciano su di esso.

Nel corso di questa seconda fase, si sono testati e messi a punto i protocolli operativi per l’acquisizione dei dati e la modellazione tridimensionale di un sito archeologico esteso e complesso, integrando efficacemente le tecniche attive e passive, per raggiungere il compromesso migliore tra la precisione del modello geometrico, l’oggetto scandito e la scala della rappresentazione. Infatti, una delle problematiche del caso studio, risiede nella necessità di usare differenti rapporti scalari nella definizione dei modelli tridimensionali. Rapporti, che partendo dall’inquadramento urbano, scendono alla scala edilizia, fino ad arrivare al dettaglio dei partiti decorativi e dei bassorilievi.

In questo quadro, i modelli tridimensionali realizzati sono altrettanti strumenti, a disposizione della Soprintendenza, per lo studio archeologico, per controllare lo stato di conservazione, per pianificare le operazioni di conservazione e restauro, nonché per essere impiegati in contesti di realtà virtuale.

La complessità e le dimensioni del Foro, la necessità di acquisire edifici, reperti archeologici, particolari architettonici, rende indispensabile l’integrazione di tecniche *range-based* e *image-based*, per sfruttare al meglio le potenzialità di entrambi i tipi di approccio. Infatti, la documentazione del Foro richiede un metodo di acquisizione in

grado di generare modelli con livelli differenti di risoluzione, integrati al fine di produrre un modello tridimensionale realistico.

L'uso delle tecniche integrate ha una duplice finalità: la scelta del livello di dettaglio per ogni singolo artefatto, in relazione al suo contenuto informativo e alle caratteristiche dello strumento usato; la possibilità di acquisire dei dati ridondanti utili, sia per verificare l'accuratezza dei modelli, confrontando le diverse tecniche, sia per integrare i dati provenienti da tecniche differenti.

Nella campagna di acquisizione sono stati usati: un *laser scanner* TOF Leica HDS 6000 a modulazione di fase, che per il *range* d'acquisizione limitato e la maggior precisione rispetto a quello ad impulsi, si è dimostrato adatto per il rilievo di ambienti ed oggetti a piccola distanza; un *laser scanner* TOF Leica HDS 3000 ad impulsi, caratterizzato da una precisione inferiore rispetto al precedente ma con una portata elevata per l'inquadramento globale del foro. Nell'ambito delle tecniche *image-based*, è stata usata la fotogrammetria digitale, sia per estrarre il DSM (*Digital Surface Model*) dell'intera area, che per la modellazione di manufatti e oggetti.

L'approccio multi-risoluzione varia dalla scala territoriale fino a quella di dettaglio delle strutture murarie, delle decorazioni e dei reperti, passando da una risoluzione geometrica di 25 cm fino a 0,2 mm. Le principali scale usate nel rilevamento possono essere raggruppate in tre categorie:

- *rilievo a bassa risoluzione* per l'inquadramento territoriale dell'area. Da tre immagini aeree, a scala 1:3500, è stato creato un DSM (*Digital Surface Model*) con una risoluzione geometrica di 25 cm, nonché i punti di riferimento per l'inquadramento topografico. Per generare la nuvola di punti è stato usato un *software* sviluppato dall'ETH (*multi-photo matcher*), ottenendo circa 18 milioni di punti, che coprono una superficie di 1x0,8 km. La mappatura della *texture* sul DSM è stata fatta mediante il *software* Pictometry, ottenendo una risoluzione di 15 cm;
- *rilievo a media risoluzione*, mediante tecniche *range-based* e *image-based*. I due *laser scanner* TOF (10 giorni di scansione, per un totale di 66 *scanworld*) hanno permesso di costruire la nuvola di punti dell'intero Foro, con una risoluzione geometrica compresa tra 5-20 mm. Questo modello tridimensionale discreto è servito da "griglia di riferimento" all'interno della quale posizionare le scansioni di dettaglio. Oltretutto, usando fotogrammetria digitale *close-range* e diverse fotocamere calibrate, sono stati creati modelli semplificati con risoluzione geometrica variabile in funzione del manufatto. In tutto sono stati acquisiti 1,2 miliardi di punti, ma ne sono stati usati "solo" 100 milioni, così distribuiti: 36 milioni per gli edifici (14 strutture) e 64 milioni per i reperti (377 reperti). L'allineamento e l'*editing* delle nuvole di punti ha richiesto 6 mesi di lavoro;

- *rilievo ad alta risoluzione*, mediante la fotogrammetria digitale *close-range*. L'uso di una fotocamera calibrata e la tecnica del *matching* automatico ha dato luogo a nuvole di punti con risoluzione geometrica di 0,5-10 mm e risoluzione della *texture* di 0,2-5 mm. Le immagini, nell'ordine delle molte migliaia, sono state usate per modellare le strutture murarie intorno al Foro e per la ricostruzione di 377 reperti. Per alcuni artefatti (colonne, piedistalli, trabeazioni, ...) è stato usato Photomodeler, mentre per le parti ricche di dettagli (fregi, bassorilievi) è stato utilizzato il *software* Clorama, sviluppato dall'ETH.

Per minimizzare l'errore di allineamento, le singole nuvole di punti sono state allineate su uno *scanworld* fatto a 360° e posizionato al centro del Foro, raggiungendo un valore pari a 10 mm. La nuvola così ottenuta è stata pulita, passando da 1,2 miliardi di punti a 100 milioni, quindi, si è proceduto alla sua *divisione semantica*, per poterla gestire in maniera più efficace, segmentando la nuvola in funzione di ogni edificio e dei singoli reperti.

I modelli ottenuti con la fotogrammetria sono stati allineati sulla nuvola di punti mediante algoritmi di *best-fitting* di geometrie simili, con un'accuratezza di 6 mm a 50 m di distanza, pari a quella del *laser scanner*.

Il modello finale semplificato dell'intero Foro è formato da 610.000 poligoni, divisi in 309 modelli. Le superfici sostanzialmente piane sono state ricostruite con pochi punti, mentre quelle ricche di dettagli, sfruttando una quantità elevata di dati. Oltretutto, sulla scorta dei suggerimenti degli archeologi coinvolti nel progetto, si è proceduto ad una semplificazione selettiva del modello poligonale iniziale, lasciando solo per alcune zone una alta risoluzione geometrica. Infine, la gestione del *texture mapping*, in maniera indipendente rispetto alla risoluzione geometrica, ha permesso di avere delle superfici geometricamente semplici con una risoluzione elevata dell'immagine (ad esempio, i paramenti murari piani realizzati con la tecnica dell'*opus reticulatum*) e superfici geometricamente complesse con *texture* uniformi. Questa ultima accortezza ha consentito di massimizzare la quantità di informazioni relative ad ogni manufatto.

RISOLUZIONE

rilievo a bassa risoluzione	risoluzione geometrica: 25 cm, risoluzione per la <i>texture</i> : 15 cm;
rilievo a media risoluzione	risoluzione geometrica: 5-20 mm;
rilievo ad alta risoluzione	risoluzione geometrica: 0,5-10 mm, risoluzione per la <i>texture</i> : 0,2-5 mm.

SOFTWARE

Leica Cyclone
Polyworks™ Modeler
Pictometry

ETH multi-photo matcher

Clorama

Photomodeler

PRODOTTI

DSM con risoluzione geometrica di 25 cm con *texture* (risoluzione di 15 cm); nuvole dense di punti con diverse risoluzioni geometriche (da 0,5 a 20 mm); nuvole rare di punti; modelli poligonali 3D (*mesh*), con differenti livelli di dettaglio e mappati con *texture* fotografiche ad alta risoluzione; elaborati grafici bidimensionali e tridimensionali, dedotti dalla nuvola e dalla *mesh* (piante, sezioni, immagini raddrizzate, viste prospettiche, ...); 3D GIS collegato con *database* archeologici.

PUBBLICAZIONI

B. BENEDETTI, M. GAIANI, F. REMONDINO (a cura di), *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa Edizioni della Normale, 2010.

M. GAIANI, B. BENEDETTI, *A responsible modelling framework for a 3D GIS archaeological prototype (The Pompeii case study)*, in Proceedings of “Electronic Imaging and the Visual Arts” (EVA 2010), Firenze (Italia), 21-23 April 2010, pp. 102-107.

G. GUIDI, M. RUSSO, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, Milano MacGraw-Hill, 2010, pp. 429-439.

F. I. APOLLONIO, B. BENEDETTI, P. DIARTE BLASCO, M. GAIANI, A. GUIDAZZOLI, *Pompeya como caso de estudio: La visualización digital aplicada a la arqueología de una ciudad vesubiana*, in “I Congreso Internacional de Arqueología e Informatica Grafica”, Sevilla (España), 17-20 giugno 2009, pp. 185-189.

M. GAIANI, B. BENEDETTI, F. I. APOLLONIO, *Standard di acquisizione e strutturazione di modelli digitali per sistemi informativi di aree archeologiche: il caso di Pompei*, in “Disegnare. Idee, Immagini” n. 39/2009, pp. 60-73.

M. GAIANI, B. BENEDETTI, P. G. GUZZO, *Scientific knowledge and information representations in historical-technical archives of archaeological sites: Pompeii as a case study*, in Proceedings of “Responsibilities and opportunities in architectural conservation: Theory, Education, and Practice” (CSAAR 2008), Amman (Jordan), 3-4 novembre 2008, pp. 275-290.

A. M. MANFERDINI, F. REMONDINO, S. BALDISSINI, M. GAIANI, B. BENEDETTI, *3D Modeling and Semantic Classification of Archaeological Finds for Management and Visualization in 3D Archaeological Databases*, in Proceedings of “XIV International Conference on Virtual Systems and Multimedia-Project Papers” (VSMM 2008), Limassol (Cyprus), 20-25 October 2008, pp. 221-228.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

F. REMONDINO, S. EL-HAKIM, A. GRUEN, L. ZHANG, *Development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects*, in “IEEE Signal Processing Magazine”, Vol. 25, n. 4, pp. 56-65, 2008.

Y. HORI, O. AJIOKA, A. HANGHAI, *Laser Scanning in Pompeian City wall-A comparative study of accuracy of the drawings from 1930s to 1940s*. *International*

Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36 (5/W7), on CD-Rom, 2007.

L. ZHANG, *Automatic Digital Surface Model (DSM) generation from linear array images*, Diss. ETH n. 16078, Technische Wissenschaften ETH Zurich, IGP Mitteilung n. 90, 2005.

M. BALZANI, M. CALLIERI, M. FABBRI, A. FASANO, C. MONTANI, P. PINGI, N. SANTOPUOLI, R. SCOPIGNO, F. UCCELLI, A. VARONE, *Digital representation and multimodal presentation of archeological graffiti at Pompei*, in Proceedings of “V International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage” (VAST 2004), 2004, pp. 93-104.

M. BALZANI, N. SANTOPUOLI, A. GRIECO, N. ZALTRON, *Laser scanner 3D survey in archaeological field: the Forum of Pompeii*, in Proceedings of “International Conference on Remote Sensing Archaeology”, 18-21 Ottobre, Beijing (China), 2004.

G. BITELLI, A. CAPRA, A. ZANUTTA, *Photogrammetric Surveying of "Nymphaea" in Pompeii*, in Proceedings of “XXVIII International CIPA Symposium”, Potsdam (Germany), 2001, pp. 236-242

SITOGRAFIA

Home page del “Progetto Pompei” (LARTTE-Scuola Nazionale Superiore di Pisa);

<http://lartte.sns.it/index.php?id=60>. (consultato il 20-8-2011)

¹ Un precedente rilievo del Foro risale al 2003 e nasce dalla sinergia tra la Soprintendenza Archeologica di Pompei, il Dipartimento e la Facoltà di Architettura di Ferrara, il DIAPReM e la Kacyra Family Foundation.

Per la campagna di acquisizione (129 ore di lavoro, distribuiti in 6 giorni consecutivi) è stato usato un *laser scanner* TOF ad impulsi HDS 2500 della Leica Geosystems. Le nuvole di punti sono state allineate mediante una serie di *target*, battuti da una stazione totale integrata Reflectorless Leica TCR1101 XR, mentre 6 capisaldi, rilevati per mezzo di un sistema di stazioni GPS (Leica GPS System 500), hanno permesso di georeferenziare le nuvole allineate. In tutto sono stati fatti 113 *scanworld*, per un totale di circa 227 milioni di punti acquisiti con due griglie teoriche differenti: una d'inquadramento generale dal passo teorico di 5x5 cm e una di dettaglio pari a 1x1 cm per registrare le geometrie.

I prodotti di questa campagna di rilievo possono essere così riassunti: immagini dedotte dalla nuvola, immagini raddrizzate della stessa con quotatura, video ottenuti da quest'ultima, elaborati canonici e modelli poligonali (*mesh*) con ombreggiatura sintetica.

Si rimanda ai seguenti siti *web* per approfondire l'argomento:

- pagina *web* del rilievo del Foro Civile di Pompei, all'interno del sito della Soprintendenza Archeologica di Pompei:

<http://www.pompeiiisites.org/Sezione.jsp?titolo=Rilievo%20Architettonico%20Del%20Fforo%20Civile%20Di%20Pompei%20Con%20Tecnologia%20Laser%20Scanner%203D&idSezione=200&idSezioneRif=2395>;

- pagina *web* relativa ai progetti e casi studio sviluppati dal DIAPREM in ambito archeologico: <http://www.diaprem.unife.it/archivio-progetti/archeologia>;
- *home page* di “Pompeii” della KFF(Kacyra Family Foundation): <http://archive.cyark.org/pompeii-intro>.

THE DIGITAL MICHELANGELO PROJECT**THE DIGITAL *FORMA URBIS ROMAE* PROJECT****8_{a, b}****UNITÀ DI RICERCA**

Stanford University; University of Washington. (M. Levoy et al.).

ANNO

Settembre 1998-Giugno 1999.

DESCRIZIONE

Il *Digital Michelangelo Project* nasce con l'obiettivo di realizzare un archivio digitale tridimensionale di alcune delle statue di Michelangelo. Il gruppo diretto dal prof. Marc Levoy scandisce, tra il settembre 1998 e il giugno 1999, dieci statue: il David, i quattro prigionieri (lo Schiavo giovane, lo Schiavo barbuto, l'Atlante, lo Schiavo che si desta), il San Matteo e le quattro statue allegoriche della Cappella Medicea (il Giorno, la Notte, l'Alba e il Crepuscolo); nonché la Cappella stessa e le sale dove sono esposte le statue¹.

A questo progetto si è affiancato il *Digital Forma Urbis Romae Project*, cioè la scansione di 1.186 frammenti della pianta marmorea severiana con l'obiettivo di realizzare una copia digitale e sviluppare un *software* capace di rimontare automaticamente i pezzi della pianta².

Contemporaneamente (tra febbraio 1998 e luglio 1999), ma svincolato da questi progetti, un gruppo di ricerca dell'IBM guidato da H. Rushmeier and F. Bernardini ha scandito la Pietà Bandini di Michelangelo, conservata al Museo dell'Opera del Duomo³.

OBIETTIVO

Modellazione 3D delle statue e dei frammenti marmorei della *Formae Urbis Romae* per l'archiviazione digitale; sviluppo di un *software* capace di assemblare automaticamente i frammenti della *Formae*.

KEYWORD

Range camera a triangolazione, *laser scanner* TOF, modello 3D, archiviazione digitale.

STRUMENTI E METODO

– *Range camera* a triangolazione Large Statue 3D Scanner MODEL LSS (Cyberware Inc.), progettato appositamente per scandire le statue di Michelangelo:

sensore CCD:	512x480 pixel;
risoluzione in y:	0,29 mm;
risoluzione in profondità:	0,10 mm (interlacciato), 0,05 mm (deinterlacciato);

- risoluzione spaziale per il colore: 0,125 mm;
 campo visivo: 14x14 cm;
 distanza minima d'acquisizione: 112 cm;
baseline: 41 cm.
- *Range camera* a triangolazione *desktop scanner* MODEL 15 (Cyberware Inc.):
 risoluzione lungo x: 0,30-1 mm⁴;
 risoluzione lungo y: 0,30 mm;
 risoluzione in profondità: 0,05-0,20 mm (in funzione della superficie);
 campo visivo: 25x15x7,5 cm;
 velocità di scansione: 14.580 punti/s.
 - *Range camera* a triangolazione (Faro Technologies e 3D Scanners Ltd.) montato su un braccio meccanico.
 - *Laser scanner* TOF (Cyra Technologies):
 risoluzione lungo xy: circa 4 mm (alla distanza di 10 m);
 risoluzione in profondità: circa 5 mm;
range di misura: fino a 100 m.

Come dichiarato da Levoy, l'obiettivo dei due progetti è la documentazione tridimensionale delle statue di Michelangelo e dei frammenti della pianta severiana che, nell'immediato, ha come risultato la realizzazione di modelli 3D fruibili liberamente per scopi di ricerca. Il *Digital Forma Urbis Romae Project*, oltre alla modellazione e catalogazione digitale, prevede lo sviluppo di un software in grado di assemblare automaticamente i frammenti della pianta, sfruttando la forma della superficie dei bordi, la direzione delle venature del marmo, lo spessore, la corrispondenza tra disegno inciso e le evidenze archeologiche.

Per la scansione delle statue di Michelangelo sono stati usati due *range camera* a triangolazione basati su una lama di luce. Uno, sviluppato appositamente dalla Cyberware Inc. di Monterey, è stato montato su una struttura a traliccio motorizzata con quattro gradi di libertà. Tale struttura, progettata per coprire un volume massimo di 7,5 m in altezza e 3 m di larghezza, è formata da una travatura verticale su cui è posizionato un braccio orizzontale che può traslare lungo la stessa e la testa, su cui è montato lo scanner, che può traslare lungo il braccio e contemporaneamente ruotare. L'altro, costruito dalla Faro Technologies e 3D Scanners Ltd., è caratterizzato da dimensioni ridotte e montato su un braccio meccanico per raggiungere i punti difficilmente accessibili. Sono stati acquisiti sia forma che colore (dotando gli *scanner* di videocamera a colori), con una griglia di scansione lungo y di 0,25 mm ed una

risoluzione lungo z di 0,05 mm. Con tali parametri si sono registrati i segni dello scalpello sulla statua.

Per le architetture, cioè per la Cappella Medicea e per le sale della Galleria, è stato usato un *laser scanner* TOF prodotto da Cyra Technologies, che ha permesso una griglia di campionamento di 4 mm (a 10 m di distanza) ed una risoluzione lungo z di 5 mm. Anche quest'ultimo sistema era in grado di registrare i colori ad alta risoluzione.

Per la scansione della *Forma Urbis Romae*, è stato affiancato al Model LSS (utilizzato per le statue), un *desktop scanner* Model 15 (sempre della Cyberware Inc.), diminuendo i tempi d'acquisizione. Si è usata una griglia di scansione, lungo x-y, di 0,25 mm con risoluzione lungo z di 0,05 mm⁵.

Tutti i modelli delle statue, tranne uno, sono anteriori all'estate del 2004. Volendo fare un resoconto del progetto ad oggi, i modelli a *mesh* (senza *texture*) realizzati sono i seguenti⁶:

- David, con risoluzione di 1 mm (56 milioni di triangoli), settembre 2000;
- David, con risoluzione di 2 mm (8 milioni di triangoli), settembre 2000;
- David, con risoluzione di 2 mm (8 milioni di triangoli), agosto 2002;
- David, con risoluzione di 0,25 mm (940 milioni di triangoli), luglio 2009;
- San Matteo, con risoluzione di 0,25 mm (372 milioni di triangoli), luglio 2000;
- Atlante, con risoluzione di 0,25 mm (500 milioni di triangoli), luglio 2000;
- Schiavo che si desta, con risoluzione di 2 mm (2 milioni di triangoli), marzo 1999;
- Schiavo giovane, con risoluzione di 2 mm (1,7 milioni di triangoli), marzo 1999;
- l'Alba, con risoluzione di 1 mm (3,4 milioni di triangoli), maggio 1999;
- il Giorno, con risoluzione di 1 mm (3 milioni di triangoli), aprile 1999
- la Notte, senza colori (11 milioni di triangoli), maggio 1999.

Per quanto riguarda i modelli dei frammenti della pianta severiana, a causa di un errore nella calibrazione di uno degli *scanner*, i modelli ad alta risoluzione dei frammenti sono circa 800, mentre i restanti 400 presentano un'alta risoluzione (0,25 mm) solo sulla superficie incisa con il resto del modello a bassa risoluzione (1-2 mm).

Il Laboratorio *Visual Computing* dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "Alessandro Faedo" (ISTI-CNR, Pisa), sotto la guida di Roberto Scopigno, ha sviluppato il progetto *Michelangelo's David Restoration* (2002-2003) sfruttando le potenzialità del modello 3D del David per il suo restauro. Il modello è stato utilizzato come strumento di indagine (studio dell'esposizione della superficie agli agenti inquinanti, analisi delle condizioni statiche) e come "sistema informativo" su cui integrare indagini di natura diversa con il fine di organizzare, documentare e presentare i dati del restauro.

Attraverso una serie di simulazioni è stata caratterizzata, qualitativamente e quantitativamente, la superficie del David in funzione della maggiore o minore distribuzione di agenti precipitativi esterni (pioggia, polvere, ...). Come risultato si è realizzata una mappatura del modello 3D a falsi colori individuando le aree con differente classe di esposizione agli agenti inquinanti. La valutazione delle condizioni statiche dell'opera (individuazione del baricentro, della sua proiezione verticale e calcolo del volume della massa marmorea) ha portato ad elaborati grafici bidimensionali in cui, sull'immagine del modello tridimensionale *shaded*, è stata individuata la proiezione in pianta del baricentro e di alcuni profili della statua.

Nell'accezione di "sistema informativo", il modello è stato indicizzato oltreché mappato, con immagini fatte in illuminazione UV (che mostrano tracce di materiali organici). Con il termine "indicizzato" intendiamo dire che sono stati referenziati, su proiezioni bidimensionali del modello 3D, le riprese fotografiche fatte prima e dopo il restauro ed una sequenza di elaborati 2D misti⁷ (disegni e immagini fotografiche). Pertanto, la mappatura ha dato luogo a un modello 3D, mentre l'indicizzazione è sfociata in una serie di elaborati bidimensionali consultabili tramite un sistema di *web-based* interattivo e finalizzati alla documentazione per il restauro.

RISOLUZIONE

Statue di Michelangelo	lungo la lama di luce (in y):	0,25 mm;
	in profondità (lungo z):	0,05 mm;
	risoluzione spaziale per il colore:	0,125 mm.
<i>Forma Urbis Romae</i>	laterale (in xy):	0,25 mm;
	in profondità (lungo z) :	0,05 mm.
	risoluzione spaziale per il colore:	0,25 mm

SOFTWARE

Software non commerciale, appositamente scritto per il progetto (Scanalyze).

PRODOTTI

Modelli poligonali 3D (*mesh*) delle statue senza *texture* e a diverse risoluzioni; particolari dei modelli delle statue con *texture* fotografica; mappaggio della fluorescenza da raggi UV sul modello 3D del David, video; *mesh* (senza colori e a diverse risoluzioni) dei frammenti della *Forma Urbis Romae*.

Inoltre è stato realizzato un sistema di archiviazione digitale *web-based* delle statue e della *Forma Urbis Romae*.

Il VCLab, utilizzando l'archivio digitale del *Digital Michelangelo Project*, ha realizzato un modello texturizzato del David mappando immagini fotografiche e UV. Dal modello 3D sono stati ottenuti elaborati grafici bidimensionali finalizzati alla documentazione, all'analisi e al restauro. Anche questo gruppo di ricerca ha prodotto un sistema *web-based* con la duplice funzione di documentazione/comunicazione.

PUBBLICAZIONI

S. BRACCI, F. FALLETTI, M. MATTEINI, R. SCOPIGNO, *Exploring David: Diagnostic Tests and State of Conservation*, Firenze Giunti Editore, 2004.

D. KOLLER, M. TURITZIN, M. LEVOY, M. TARINI, G. CROCCI, P. CIGNONI, R. SCOPIGNO, *Protected Interactive 3D Graphics Via Remote Rendering*, in “ACM Trans. on Graphics” (SIGGRAPH 2004), vol. 23, n. 3, agosto 2004, pp. 695-703.

F. BERNARDINI, H. RUSHMEIER, I. M. MARTIN, J. MITTLEMAN, G. TAUBIN, *Building a Digital Model of Michelangelo’s Florentine Pietà*, in “IEEE Computer Graphics and Applications”, gennaio-febbraio 2002, Vol. 22, n. 1, pp. 59-67.

M. PIERACCINI, G. GUIDI, C. ATZENI, *3D digitizing of cultural heritage*, in “Journal of Cultural Heritage”, Vol. 2, n. 1/2001, pp. 63-70.

M. LEVOY, K. PULLI, B. CURLESS, S. RUSINKIEWICZ, D. KOLLER, L. PEREIRA, M. GINZTON, S. ANDERSON, J. DAVIS, J. GINSBERG, J. SHADE, D. FULK, *The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues*, in Proceedings SIGGRAPH 2000 (New Orleans, Louisiana, 23-28 July 2000). In “Computer Graphics Proceedings”, Annual Conference Series ACM SIGGRAPH, 2000, pp. 131-144.

M. LEVOY, *The digital Michelangelo project*, in Proceedings of “II Intl. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling”, Ottawa (Canada), Ottobre 1999, pp. 2–13.

M. LEVOY, *The Digital Michelangelo Project: creating a 3D archive of his sculptures using laser scanning*, in proceedings of “Electronic Imaging and the Visual Arts” (EVA 1999), Firenze (Italia), 26 marzo 1999.

D. KOLLER, M. LEVOY, *Computer-Aided Reconstruction and New Matches in the Forma Urbis Romae*, in “Formae Urbis Romae. Nuovi frammenti di piante marmoree dallo scavo dei Fori Imperiali”, Bollettino della Commissione Archeologica Comunale di Roma. Suppl. 15, R. MENEGHINI, R. SANTANGELI VALENZANI (a cura di), L’Erma di Bretschneider, Roma 2006, pp. 103-126.

D. KOLLER, J. TRIMBLE, T. NAJBBERG, N. GELFAND, M. LEVOY, *Fragments of the City: Stanford’s Digital Forma Urbis Romae Project*, in “Proceedings of the Third Williams Symposium on Classical Architecture, Journal of Roman Archaeology, Suppl. 61, 2006, pp. 237-252.

M. LEVOY, *Digitizing the Forma Urbis Roma*, presented at the Siggraph “Digital Campfire” on Computers and Archeology Snowbird, Utah, aprile 2000.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

M. CALLIERI, F. PONCHIO, P. CIGNONI, R. SCOPIGNO, *Virtual Inspector: a flexible visualizer for dense 3D scanned models*, in “IEEE Computer Graphics and Applications”, Vol. 28, n. 1, gennaio-febbraio 2008, pp. 44-55.

M. DELLEPIANE, M. CALLIERI, F. PONCHIO, R. SCOPIGNO, *Mapping highly detailed color information on extremely dense 3D models: the case of David's restoration*, Computer Graphics Forum, Vol. 27, n. 8, 2008, pp. 2178-2187.

M. DELLEPIANE, M. CALLIERI, F. PONCHIO, R. SCOPIGNO, *Mapping highly detailed color information on extremely dense 3D models: the case of David's restoration*, in Proceedings of "Eurographics Conference-Cultural Heritage Papers", 2007.

B. BROWN, S. RUSINKIEWICZ, *Global Non-Rigid Alignment of 3-D Scans*, in Proceedings of "ACM" (SIGGRAPH 2007), Vol. 26, n. 3, luglio 2007, art. n. 21.

R. SCOPIGNO, *Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale*, in "Laser Scanner e GPS. Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali", S. Campana, R. Francovich (a cura di), Edizioni all'Insegna del Giglio, Firenze 2005, pp. 41-68.

M. CALLIERI, P. CIGNONI, F. GANOVELLI, G. IMPOCO, C. MONTANI, P. PINGI, F. PONCHIO, R. SCOPIGNO, *Restoring David using 3D*, in "IEEE Potentials", Vol. 23, n.5, dicembre 2004-marzo 2005, pp.4-7.

M. CALLIERI, P. CIGNONI, F. GANOVELLI, C. MONTANI, P. PINGI, R. SCOPIGNO, *Visualization and 3D data processing in David's restoration*, in "IEEE Computer Graphics and Applications", Vol. 24, n. 2, marzo-aprile 2004, pp.16-21.

R. SCOPIGNO, P. CIGNONI, M. CALLIERI, F. GANOVELLI, G. IMPOCO, P. PINGI, F. PONCHIO, *Using optically scanned 3D data in the restoration of Michelangelo's David*, In Proceedings of "SPIE International Symposium on Optical Metrology", Monaco (Germania), 23-26 giugno 2003, Vol. 5146.

R. SCOPIGNO, M. CALLIERI, P. CIGNONI, F. GANOVELLI, C. MONTANI, P. PINGI, *Il modello digitale 3D del David e il suo uso nel progetto di restauro*, in "Kermes", Anno XVI, n. 49/2003, pp. 45-49.

G. GODIN, J.-A. BERARDIN, L. COURNOYER, M. RIOUX, F. BLAIS, *NRC's Participation in the Digital Michelangelo Project*, in Proceedings of "Canada-Italy Workshop: Heritage Applications of 3D Digital Imaging", Ottawa (Canada), 1 ottobre 1999, 1999
SITOGRAFIA

Home page del "The Digital Michelangelo Project";

<http://graphics.stanford.edu/projects/mich>. (consultato il 8-8-2009)

Home page del "The Digital Forma Urbis Romae Project";

<http://graphics.stanford.edu/projects/forma-urbis>. (consultato il 8-8-2009)

Home page dello "Stanford Digital Forma Urbis Romae Project" (public version);

<http://formaurbis.stanford.edu>. (consultato il 8-8-2009)

Home page dello "Stanford Digital Forma Urbis Romae Project" (scholar version)⁸;

<http://rockpile.stanford.edu> (consultato il 8-8-2009)

Home page di Marc Levoy (professore di informatica all'Università di Stanford);

<http://graphics.stanford.edu/~levoy>. (consultato il 8-8-2009)

Home page del Visual Computing Lab (ISTI-CNR, Pisa);

<http://vcg.isti.cnr.it>. (consultato il 8-8-2009)

Home page del “Michelangelo’s David Restoration” (VCLab, ISTI-CNR, Pisa);

<http://vcg.isti.cnr.it/projects/projects.htm>. (consultato il 8-8-2009)

Home page del “Pietà Project” (progetto di ricerca dell’IBM);

<http://www.research.ibm.com>. (consultato il 8-8-2009)

¹ Per la scansione del David è stato necessario 1 mese di lavoro, mentre per le altre statue, 1 settimana ciascuna. Il David è una statua in marmo bianco dell’altezza di 516 cm, realizzata da Michelangelo tra il 1501 ed 1504 e custodita, dal 1873, nella Galleria dell’Accademia a Firenze. Nel 2003, la statua è stata sottoposta a un intervento di pulitura della superficie.

² La *Forma Urbis Romae* (*Forma Urbis Severiana* o pianta marmorea severiana), realizzata tra il 203 ed il 211 a.C., è una pianta della città di Roma antica disegnata in scala 1:240. La pianta (18,10x13 m) è incisa su 150 lastre rettangolari di marmo di diversa dimensione, che sono organizzate su 11 filari, a formare una dettagliata rappresentazione dei piani terra di tutti gli edifici della città, spingendosi fino al dettaglio dei colonnati e delle scale interne. Attualmente si conoscono 1.186 frammenti delle lastre, che corrispondono al 10-15% del totale.

³ Obiettivo principale del progetto è stata la realizzazione di un modello tridimensionale della Pietà allo scopo di documentare l’opera e, secondariamente, verificare le teorie del prof. J. Wasserman sulla sua composizione. Per la scansione è stato utilizzato una versione modificata del Virtuoso ShapeCamera (Visual Interface Inc.) settato con una griglia di scansione di 2 mm. Lo strumento, a luce strutturata, ha le seguenti caratteristiche: campo visivo di 20x20 cm; velocità di scansione media pari a 10.000 punti/s; risoluzione massima lungo z (misurata in laboratorio) di $\pm 0,1$ mm. Il prodotto finale è un modello a *mesh* su cui sono state spalmate foto ad alta risoluzione, immagini ai raggi X e in illuminazione UV, utilizzato per una serie di analisi sulla composizione dell’opera; per visualizzare la statua da punti di vista inusuali; per ottenere misure precise, atte a studiare le proporzioni usate da Michelangelo; ricostruzione virtuale della collocazione prevista da Michelangelo e di alcune di quelle avute nel corso del tempo (da cui sono state tratte immagini e video); visualizzazione interattiva del modello tramite un *user-friendly software* appositamente realizzato. Quindi il modello visto come strumento di documentazione, analisi e divulgazione. Per un più approfondito studio si rimanda a: J. WASSERMAN (a cura di), *Michelangelo’s Florence Pietà*, Princeton University Press, 2003 ed al sito internet <http://www.research.ibm.com>.

⁴ La variabilità dipende dalla velocità di rotazione della piattaforma.

⁵ Dei 1186 frammenti scansionati, 1163 sono stati acquisiti nel maggio 1999, mentre 23 frammenti, scoperti successivamente, sono stati digitalizzati nel 2001.

⁶ Per maggiori informazioni si rimanda alla pagina web del “*The Digital Michelangelo Project Archive*” all’indirizzo: <http://graphics.stanford.edu/dmich-archive>.

⁷ Sulla base delle riprese fotografiche sono stati trascritti su un supporto trasparente: la posizione e la forma dei taroli, le venature del marmo, depositi superficiali e consunzione della superficie. Quindi questi elaborazioni grafiche sono state digitalizzate e sovrapposte alle riprese fotografiche.

⁸ Questa è la versione *scholar* del sito dell’archivio digitale online dello “*Stanford Digital Forma Urbis Romae Project*”. Tale versione consente di vedere e scaricare i modelli 3D e le foto ad alta risoluzione (ma necessita di adeguati permessi), a differenza della *public version* che non richiede nessuna autorizzazione ma permette di vedere solamente i modelli 3D e di scaricare foto a media risoluzione.

UNITÀ DI RICERCA

Visual Computing Lab dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione (ISTI-CNR, Pisa); Istituto di Ottica Applicata (INOA-CNR, Firenze). (R. Scopigno et al.).

ANNO

2000-2007.

DESCRIZIONE

Il progetto “*The Digital Minerva-The Restoration of the Minerva di Arezzo*” vuol dimostrare che la realizzazione di modelli tridimensionali è un potente strumento di supporto per il restauro, integrando le analisi diagnostiche usuali.

Il caso studio su cui sono state sondate le potenzialità derivanti dall'integrazione dei metodi diagnostici tradizionali come le tecniche ottiche di misura 3D, è una statua d'epoca romana: la Minerva d'Arezzo. L'opera, un bronzo di 155 cm d'altezza scoperto ad Arezzo nel 1541, nel corso dei secoli è stata restaurata con inserti in legno e gesso dipinto (nella parte inferiore), mentre il braccio destro è stato completamente rifatto in bronzo (1785). Il pessimo stato di conservazione e i deleteri interventi subiti nel corso dei secoli hanno reso necessario il restauro dell'opera. La fase operativa del restauro è stata preceduta da una campagna di indagini (analisi chimiche, radiografiche, termografiche, fluorescenza UV, ...), di saggi di pulitura della superficie, dal rilievo fotografico e tridimensionale dell'opera.

Il suo restauro si inserisce all'interno del progetto di studio e conservazione sui “grandi bronzi” del Museo archeologico fiorentino promosso dal centro di restauro della Soprintendenza Archeologica per la Toscana.

OBIETTIVO

Realizzazione di una serie di modelli tridimensionali della statua per descrivere le fasi del restauro; elaborazione di un *software* in grado di produrre disegni 2D dal modello tridimensionale; progettazione di un sistema *web-based user-friendly* finalizzato alla documentazione per il restauro.

KEYWORD

Range camera a triangolazione, *scanner a luce strutturata*, modello 3D, sistema *web-based* per il restauro.

STRUMENTI E METODO

- *Scanner* a luce strutturata progettato dal CNR/CNUCE, in grado di fornire una densità di campionamento di circa 0,7 mm lungo la verticale e 1,4 mm lungo

l'orizzontale (CCD del videoproiettore di 1024x768 pixel, posto a distanza di circa 1,3 m dall'oggetto).

- *Range camera* a triangolazione sviluppato dall'INOA di Firenze, con focale da 16mm montato su una slitta motorizzata:

sensore CCD:	1.300x1.300 pixel;
risoluzione lungo z:	0,05 mm;
errore assoluto:	inferiore a 0,30 mm;
campo visivo:	30x30x30 cm;
distanza media d'acquisizione:	50 cm.
- *Range camera* a triangolazione MINOLTA-Vivid 900 (Konica Minolta):

sensore CCD:	640x480 pixel (24 bit);
volume di misura:	da 100x80x40 mm (tele) a 1200x900x400 mm (wide);
profondità di campo:	da 60 cm a 250 cm (range di misura ottimale: 60-120 cm);
risoluzione lungo z:	da $\pm 0,19$ mm (tele) a $\pm 0,64$ mm (wide);
precisione:	x= $\pm 0,22$ mm, y= $\pm 0,16$ mm, z= $\pm 0,10$ mm;
velocità di scansione:	100.000 punti/s;
illuminazione ambientale:	inferiore a 500 lux.

Il rilievo è stato fatto dal Laboratorio *Visual Computing* del ISTI-CNR di Pisa, il quale ha programmato e realizzato una sequenza di quattro acquisizioni per documentare l'opera prima del restauro e in alcune fasi intermedie dello stesso. A tale scopo il VCLab ha deciso di usare strumentazioni diverse confrontando i risultati, testare i *software* prodotti e sperimentare differenti metodi di acquisizione.

Sono state effettuate scansioni con un *scanner* a luce strutturata progettato dal CNR e con due *range camera* a triangolazione: uno sviluppato dall'INOA di Firenze (montato su slitta motorizzata) e l'altro prodotto dalla Minolta (Vivid 900). Il sistema a luce strutturata sviluppato dal CNR è basato su tecnologia a basso costo e utilizza elettronica di consumo. Un tale sistema ha il pregio di poter essere aggiornato, con l'evolversi della tecnologia, senza spese eccessive. Nella prima campagna di scansione (146 *range map*, 5 giorni, ottobre 2000), da questo scanner si sono ottenute *range map* con una risoluzione di circa 0.7mm lungo la verticale e 1,4 mm sull'orizzontale. Nella seconda campagna di scansione (119 *range map*, 5 giorni, aprile 2001), con la *range camera* a triangolazione dell'INOA, basato su una lama di luce, si è usata risoluzione spaziale di campionamento pari a 0,25 mm, con risoluzione lungo z di 0,05 mm (distanza media d'acquisizione di 50 cm). La terza e la quarta campagna di scansione risalgono al marzo (297 *range map*, 1 giorno) e all'ottobre (306 *range map*, 1 giorno) del 2002 e sono state fatte con il Vivid 900, scanner commercializzato dalla Minolta.

Tutte le procedure (allineamento e fusione delle *range map*, *editing* del modello digitale, semplificazione della *mesh*, *texture mapping*) sono state gestite tramite *software* scritto dal VCLab.

Dalle acquisizioni fatte sono state ottenuti i seguenti modelli 3D (*mesh*) della Minerva¹:

- Model 1 con risoluzione di 0,57 mm (26 milioni di triangoli) ottenuto dalla scansione con lo *scanner* a luce strutturata del CNR, ottobre 2000;
- Model 2 con risoluzione di 0,5 mm (30 milioni di triangoli) ottenuto dalla scansione con la *range camera* a triangolazione dell'INOA, aprile 2001;
- Model 3, con risoluzione di 0,3 mm (65,6 milioni di triangoli) ottenuto dalla scansione con la *range camera* a triangolazione Minolta Vivid 900, marzo 2002;
- Model 4 con risoluzione di 0,3 mm (68,5 milioni di triangoli) ottenuto dalla scansione con la *range camera* a triangolazione Minolta Vivid 900, ottobre 2002.

Anche in questo caso il VCLab, al pari di già fatto per il David di Michelangelo, specializza il modello 3D come strumento di indagine (restauro virtuale, estrazione di elaborati bidimensionali), di documentazione e presentazione dei risultati (sistema *web-based*, animazioni)². Quindi, il progetto porta alla:

- realizzazione di modelli accurati dal punto di vista della rispondenza metrica all'originale, per concretizzare la possibilità di attuare varie ipotesi di restauro virtuale, agendo sul modello e verificando il risultato prima di intervenire sull'opera;
- Progettazione di un sistema *web-based* per organizzare informazioni di natura diversa, referenziandole direttamente sul modello 3D. Una sorta di sistema informatico paragonabile al GIS per natura, gestione e possibilità, ma finalizzato alla documentazione per il restauro;
- Estrazione di elaborati bidimensionali. Sempre per rispondere all'esigenza del restauro è stato elaborato un software in grado di ottenere, direttamente dal modello tridimensionale, proiezioni ortogonali e profili, cioè elaborati bidimensionali;
- Realizzazione di due animazioni, prodotte dall'ISTI-CNR e Numeri s.r.l., che esemplificano altrettante ipotesi della postura originaria del braccio destro³.

RISOLUZIONE

Scanner a luce strutturata CNR: passo di campionamento: 1,4x0,7 mm;

Range camera a triangolazione INOA: passo di campionamento: 0,25 mm;

risoluzione lungo z: 0,05 mm;

Range camera a triangolazione MINOLTA (Vivid 900):

precisione (x, y, z): $x=\pm 0,22$ mm, $y=\pm 0,16$ mm, $z=\pm 0,10$ mm.

SOFTWARE

Software non commerciale, scritto dal VCLab (ISTI-CNR):

MeshAlign (allineamento), MeshMerge (fusione), MeshEdit (*editing*), MeshSimplify (semplificazione), Weaver (*texture mapping*); Cavalieri (estrazione disegni 2D dal modello 3D).

PRODOTTI

Modelli poligonali 3D (*mesh*) delle statua con diverse risoluzioni; *Mesh* di parti della statua con *texture* fotografica ad alta risoluzione; un sistema *web-based* finalizzato alla documentazione per il restauro ed alla comunicazione dei risultati; animazioni.

PUBBLICAZIONI

M.C. GAMBINO, R. FONTANA, M. GRECO, E. PAMPALONI, L. PEZZATI, P. PINGI, P. CIGNONI, R. SCOPIGNO, *Supporting the restoration of the Minerva of Arezzo*, in “V International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks” (LACONA V), Osnabrueck (Germany), 15-18 settembre 2003.

R. FONTANA, M. GRECO, M. MATERAZZI, E. PAMPALONI, L. PEZZATI, C. ROCCHINI, R. SCOPIGNO, *Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo*, in “Cultural Heritage Journal”, Vol. 3 n. 4/2002, pp. 325-331.

R. FONTANA, L. PEZZATI, M.C. GAMBINO, M. GRECO, E. PAMPALONI, C. ROCCHINI, *3D digital model of the Minerva of Arezzo*, in Atti di “ICO XIX” (Firenze), 26-30 agosto 2002.

R. FONTANA, M. GRECO, E. PAMPALONI, L. PEZZATI, C. ROCCHINI, *3D scanning the Minerva of Arezzo*, in Atti del “VIII European Conference for Non Destructive Testings” (ECNDT 2002), Barcellona (Spagna), 17-21 giugno 2002.

R. FONTANA, M. GRECO, E. PAMPALONI, L. PEZZATI, C. ROCCHINI, *3D modelling of statues: the Minerva of Arezzo*, in Atti del “VII International Conference on Non-destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage” (ART 2002), Anversa (Belgio), 2-8 giugno 2002.

R. FONTANA, M.C. GAMBINO, M. GRECO, E. PAMPALONI, L. PEZZATI, *La Minerva di Arezzo: dal rilievo tridimensionale al modello digitale*, in Atti di Elettroottica 2002, VII Convegno Nazionale “Strumentazione e Metodi di Misura Elettroottici”, Montecatini Terme (PT), 29-31 maggio 2002.

C. ROCCHINI, P. CIGNONI, C. MONTANI, P. PINGI, R. SCOPIGNO, R. FONTANA, M. GRECO, E. PAMPALONI, L. PEZZATI, M. CYGIELMAN, R. GIACHETTI, G. GORI, M. MICCIO, R. PECCHIOLI, *3D scanning the Minerva of Arezzo*, in “International Cultural Heritage Informatics Meeting” (ICHIM 2001), 3-7 settembre 2001, Vol. 2, Milano 2001, pp. 265-272.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

M. CALLIERI, F. PONCHIO, P. CIGNONI, R. SCOPIGNO, *Virtual Inspector: a flexible visualizer for dense 3D scanned models*, in “IEEE Computer Graphics and Applications”, gennaio-febbraio 2008, Vol. 26, n.1, pp. 44-55.

R. SCOPIGNO, *Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale*, in “Laser Scanner e GPS. Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali”, S. CAMPANA, R. FRANCOVICH (a cura di), Firenze Edizioni all’Insegna del Giglio, 2005, pp. 41-68.

SITOGRAFIA

Home page de “*il restauro della Minerva d’Arezzo*” (Soprintendenza Archeologica della Toscana, Firenze; ISTI-CNR, Pisa);

<http://vcg.iei.pi.cnr.it/~scopigno/minervaweb>. (consultato il 8-8-2009)

Home page del “*Digital Minerva-The Restoration of the Minerva di Arezzo*” (Visual Computing Lab);

http://vcg.isti.cnr.it/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=63&Itemid=27.

(consultato il 8-8-2009)

Home page del Visual Computing Lab (ISTI-CNR, Pisa);

<http://vcg.isti.cnr.it>. (consultato il 8-8-2009)

Sito con informazioni sulle attività, le pubblicazioni, i progetti e le persone del Visual Computing Lab (ISTI-CNR, Pisa);

<http://vcg.isti.cnr.it/publications/publications.htm>. (consultato il 8-8-2009)

¹ Per maggiori informazioni sui modelli si rimanda alla pagina web del “*Visual Computing Lab*” all’indirizzo: http://vcg.isti.cnr.it/joomla/index.php?option=com_content&task=view&id=63&Itemid=27&limit=1&limitstart=2.

² Il VCLab con i progetti *Michelangelo’s David Restoration* e *Digital Minerva* esplora le potenzialità del modello 3D finalizzato alla conservazione e al restauro, sviluppando sistemi ottici di misura 3D e *software* per gestire il processo di scansione dall’acquisizione sino all’archiviazione e all’utilizzo dei dati. Gli studi si concentrano sulla realizzazione di modelli 3D di supporto al restauro, sulla documentazione e comunicazione del restauro (catalogazione digitale, visualizzazione interattiva, ricostruzioni e visite virtuali, ...). In questo solco si muove il progetto di scansione e ricostruzione virtuale del monumento funerario di Arrigo VII (2003-2004).

Il sepolcro (XIV secolo) venne realizzato da Tino di Camaino e originariamente collocato nell'abside del Duomo di Pisa, successivamente, le statue che lo componevano (almeno 15) furono disperse.

La scansione degli elementi, che – probabilmente – componevano il monumento, è stata fatta con un *laser scanner* Minolta Vivid 910, adoperando una griglia di scansione variabile da 0,3 mm a 0,5 mm (a seconda dell'oggetto da acquisire).

A valle della scansione e modellazione 3D e sulla base di ipotesi storico/artistiche, il sepolcro è stato virtualmente ricomposto e collocato nella sua posizione originaria, simulando diverse ipotesi costruttive dell'aspetto originario.

(cfr. C. BARACCHINI, A. BROGI, M. CALLIERI, L. CAPITANI, P. CIGNONI, A. FASANO, C. MONTANI, C. NENCI, R. P. NOVELLO, P. PINGI, F. PONCHIO, R. SCOPIGNO, *Digital reconstruction of the Arrigo VII funerary complex*, in Proceedings of the 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Intelligent Cultural Heritage (VAST 2004), Bruxelles (Belgio), 6-10 dicembre 2004, pp. 145-154. Ed ancora: R. SCOPIGNO, *Gestione efficiente dei dati prodotti dai sistemi di scansione tridimensionale*, in “*Laser Scanner e GPS. Paesaggi Archeologici e Tecnologie Digitali*”, S. Campana, R. Francovich (a cura di), Firenze Edizioni all'Insegna del Giglio, 2005, pp. 41-68).

³ A fine Settecento, il vecchio braccio in gesso venne sostituito da un braccio in bronzo, che - attualmente- è considerato meno fedele all'originale dell'esemplare in gesso rimosso.

UNITÀ DI RICERCA

Politecnico di Milano-Facoltà del Design; Laboratorio Tecnologie per i beni culturali dell'Università di Firenze; NRC Canada. (G. Guidi, J.-A. Beraldin, C. Atzeni et al.).

ANNO

2000.

DESCRIZIONE

Statua in legno (con inserti di stoffa e gesso) dell'altezza di 188 cm, realizzata da Donatello tra il 1454 ed 1454. Il restauro del 1967-69 ha riportato alla luce il primitivo colore usato da Donatello (nascosto da una mano di pittura color legno) oltreché le filettature d'oro dei capelli. Attualmente la statua presenta una superficie scura punteggiata da chiazze dorate.

OBIETTIVO

Monitoraggio dimensionale del modello della statua e archiviazione digitale.

KEYWORD

Range camera a luce strutturata, fotogrammetria analogica e digitale, integrazione tra ICP e fotogrammetria digitale per migliorare l'allineamento, modello 3D (verifica dimensionale del modello ottenuto dall'allineamento ICP con la stereofotogrammetria analogica, confronto dimensionale del modello ottenuto dal solo allineamento ICP con quello ottenuto integrando ICP e fotogrammetria digitale).

STRUMENTI E METODO

Integrazione tra:

- *Sistema a luce strutturata* OPTO 3D-Ranger® (OPTONET srl, Brescia) che permette di variare il *set-up* optogeometrico:

sensore CCD:	576x768 pixel;
volume di misura:	da 320x240x160 mm a 70x50x50 mm;
risoluzione orizzontale:	da 0,42 mm a 0,09 mm;
incertezza di misura:	da 0,15 mm a 0,02 mm;
velocità di acquisizione:	210.000 punti/s.
- *Stereofotogrammetria analogica* (coppie di fotogrammi stereoscopici di 130x180 mm ottenute da una camera metrica dotata di obiettivo con focale di 150 mm). L'orientamento delle immagini metriche e la stima delle coordinate 3D sono state ottenute usando uno stereorestitutore meccanico (Officine Galileo).

- *Fotogrammetria digitale:*
 fotocamera Nikon Coolpix 5000;
 ShapeCapture™ (ShapeQuest Inc.).

Tutta la statua è stata scandita alla risoluzione laterale (in xy) di 0,50 mm, mentre per alcune parti (cfr. RISOLUZIONE) il modello è stato integrato con ulteriori scansioni a risoluzione maggiore (0,25 mm e 0,10 mm).

La testa è stata l'unica parte della statua editata in modo da essere usata nelle presentazioni multimediali, a differenza del resto che è stato lasciato in forma grezza per evitare l'aggiunta di dati non "originali". Nel pianificare la fase di acquisizione, si è deciso di scandire la statua per fasce orizzontali, traslando verticalmente la *range camera* in modo da avere una sovrapposizione del 25% tra fasce adiacenti. A loro volta, ogni singola fascia orizzontale è stata suddivisa in 10-13 acquisizioni con sovrapposizione del 40%.

La stereofotogrammetria analogica è stata usata per verificare il modello 3D ottenuto con il solo allineamento ICP; mentre, in una seconda fase, è stato integrato l'allineamento ICP con la fotogrammetria digitale, riscontrando un miglioramento rispetto all'uso del solo ICP nell'allineare le singole *range map*.

Cioè si è sviluppato un metodo per controllare l'allineamento dei dati ad alta densità e accuratezza provenienti dalla *range camera* (e relativi a piccoli volumi) con le coordinate spaziali di pochi punti disposti lungo tutta l'altezza della statua. A tale scopo, sono stati posizionati sulla scena una serie di bersagli ottici (quattro pianetti da collimazione) adatti ad essere ripresi sia dalla *range camera* che dalla fotocamera digitale, quindi sono stati scanditi i bersagli e ampie parti della statua per allineare le *range map* acquisite precedentemente¹. La stereofotogrammetria analogica ha denunciato la presenza di deviazioni verticali (scostamento massimo di circa 5 mm) presenti nel modello ottenuto dal solo allineamento ICP. L'allineamento ICP guidato dalla fotogrammetria digitale, usato per correggere le deviazioni verticali, ha evidenziato anche rilevanti deviazioni laterali. Tali deviazioni, che raggiungono valori massimi di circa 2 cm, hanno portato ad una sorta di torsione del modello lungo l'altezza. L'integrazione allineamento ICP e fotogrammetria digitale ha permesso di raggiungere risultati migliori.

Il modello della statua, ottenuto dall'unione di 374 scansioni, ha una risoluzione di 0,25 mm con un'incertezza lungo z di 70 µm ed è formato da 4,6 milioni di poligoni.

RISOLUZIONE

laterale (in xy): 0,50 mm (aree meno ricche di dettagli, come schiena e braccia);
 0,25 mm (aree ricche di dettagli, come viso, mani e piedi);
 0,10 mm (aree con fenditure o difetti dovuti all'invecchiamento).

SOFTWARE

Polyworks™ Modeler (allineamento e *editing*);

ShapeCapture™ (fotogrammetria digitale).

PRODOTTI

Modello poligonale 3D (*mesh*) dell'intera statua e *editing* della *mesh* della sola testa (per poterla usare in presentazioni multimediali).

PUBBLICAZIONI

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto fisico al suo calco digitale*, Milano POLI.DESIGN, 2004, pp. 217-239.

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, C. ATZENI, *High-Accuracy 3-D Modeling of Cultural Heritage: The Digitizing of Donatello's "Maddalena"*, in “IEEE Transactions on image processing”, Vol. 13, n. 3, 2004, pp. 370-380.

G. GUIDI, A. CIOCI, C. ATZENI, J.-A. BERARDIN, *Accuracy verification and enhancement in 3D modeling: application to Donatello's "Maddalena"*, in “3-D Digital Imaging and Modeling” (3DIM 2003), 2003, pp. 334-342.

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, S. CIOFI, A. CIOCI, C. ATZENI, *3D Acquisition of Donatello's Maddalena: Protocols, Good Practices and Benchmarking*, in Proceeding of “Electronic Images and the Visual Arts” (EVA 2003), 2003, pp. 174-178.

J.-A. BERARDIN, G. GUIDI, S. CIOFI, C. ATZENI, *Improvement of metric accuracy of digital 3D models through digital photogrammetry. A case study: Donatello's Maddalena*, in “IEEE Proceedings of the International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission” (3DPVT 2002), 2002, pp. 758-761.

G. GUIDI, M. PIERACCINI, S. CIOFI, V. DAMATO, J.-A. BERARDIN, C. ATZENI, *Tridimensional digitizing of Donatello's Maddalena*, in Proceeding of “2001 International Conference on Image Processing”, Thessaloniki (Greece), 7-10 ottobre 2001, Vol. 1, 2001, pp. 578-581.

G. GUIDI, D. OSTUNI, F. COSTANTINO, M. PIERACCINI, G. TUCCI, J.-A. BERARDIN, *Photogrammetry and 3D Scanning: Assessment of Metric Accuracy for the Digital Model of Donatello's Maddalena*, in Proceedings of “2001 Workshop of Italy-Canada on 3D Digital Imaging and Modeling Application of: Heritage, Industry, Medicine, and Land”, Padova (Italia), 3-4 aprile, 2001.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, S. CIOFI, C. ATZENI, *Fusion of range camera and photogrammetry: a systematic procedure for improving 3D models metric accuracy*, in “IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics”, Part B, Vol. 33, n. 4, 2003, pp. 667-676.

¹ Il modello ottenuto dal solo allineamento ICP presenta un errore massimo, lungo la direzione dell'altezza della statua, di 5 mm; mentre l'allineamento integrato (ICP e fotogrammetria digitale) ha portato ad un'accuratezza di mezzo millimetro.

UNITÀ DI RICERCA

Laboratorio Tecnologie per i Beni Culturali dell’Università di Firenze; NRC Canada. (G. Guidi, C. Atzeni et al.).

ANNO

2004¹.

DESCRIZIONE

Statua in bronzo dorato di 158 cm d’altezza, realizzata da Donatello tra il 1439 ed il 1443 e conservata nel Museo Nazionale del Bargello a Firenze. La scultura è posta su di un piedistallo di 1 metro circa d’altezza ed è caratterizzata da una superficie molto scura e ossidata con tracce di doratura.

OBIETTIVO

Modellazione 3D della statua per l’archiviazione digitale².

KEYWORD

Laser radar FM CW, modello 3D.

STRUMENTI E METODO

- *Laser radar* LR200 (MetricVision Inc. e Leica Geosystem), sistema TOF-FM³.

campo visivo:	360°x270°;
velocità di acquisizione:	10-500 punti/s;
peso:	70 kg.

A causa della superficie scura (bronzo ossidato), caratterizzata da un forte assorbimento luminoso (e quindi da una bassissima riflettività), i risultati prodotti dai sistemi a triangolazione, hanno un’incertezza di misura elevata. Pertanto si è usato il *laser radar* LR200 che permette di ottenere un’incertezza di misura equiparabile ai sistemi a triangolazione pur essendo basato sulla stima del tempo di volo.

Per scandire l’intera statua sono state utilizzate cinque posizioni di scansione, mentre l’acquisizione dei dati è stata organizzata in due fasi distinte: dapprima è stata usata una griglia di 1 punto al mm per le zone meno ricche di dettagli (ad esempio il corpo) con l’obiettivo di ottenere un modello con lacune limitate; mentre una griglia di 2 punti al mm ha coperto le superfici più complesse, come il viso del David, la testa di Golia con l’elmo istoriato. Tutta la procedura, seppur lenta, è stata fatta in modalità automatica (la velocità di acquisizione è stata di 50 punti/s).

Tutta la procedura di allineamento delle scansioni è stata semplificata utilizzando una serie di sfere metalliche rettificate, quindi si è passato alla generazione della *mesh* con Polyworks™ partendo da una nube di punti non strutturata.

Questa prima modellazione ha permesso di valutare la presenza di lacune della *mesh* e quindi di programmare – in maniera efficace – la seconda fase di acquisizione al fine di coprire le stesse. Le singole scansioni sono state allineate con la *mesh* ottenuta dalla prima fase utilizzando il solo algoritmo ICP di Polyworks™. Una lunga elaborazione manuale di *editing* ha permesso di coprire le lacune residue.

RISOLUZIONE

1 punto al mm (aree meno ricche di dettagli, come il corpo);

2 punti al mm (aree ricche di dettagli, come il viso del David, la testa di Golia con l'elmo istoriato).

SOFTWARE

Polyworks™ Modeler (allineamento e *meshing*).

PRODOTTI

Modello poligonale 3D (*mesh*) dell'intera statua e *editing* della stessa per ridurre le lacune.

PUBBLICAZIONI

A. CIOCI, A. SPINETTI, L. CAROSSO, C. ATZENI, *Digital Three-Dimensional Modeling of Donatello's David by Frequency-Modulated Laser Radar*, "Studies in Conservation", Vol. 54, n. 1, 2009, p. 3-11.

G. GUIDI, A. SPINETTI, C. ATZENI, *Il David di Donatello: modellazione digitale tridimensionale di Beni Artistici mediante Laser Radar FM CW*, in "Kermes", Anno XIX, n. 61/2006, pp. 46-54.

A. CIOCI, A. SPINETTI, L. CAROSSO, C. ATZENI, *Digital Three-Dimensional Modeling of Heritage by Frequency-Modulated Laser Radar: the case of Donatello's "David"*, in "VI International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage" (VAST 2005), 2005.

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto fisico al suo calco digitale*, Milano POLI.DESIGN, 2004, pp. 239-245.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

B. P. STROZZI (a cura di), *Donatello: il David Restaurato*, Firenze Giunti Editore, 2008.

J.-A. BERARDIN, *Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry-The Last Decade and Beyond*, in "XX Congress, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing", 12-23, luglio 2004, pp. 972-983.

SITOGRAFIA

Home page de "il restauro del David di Donatello" (Firenze, Museo Nazionale del Bargello);

<http://www.polomuseale.firenze.it/restaurodonatello>. (consultato il 6-8-2009)

¹ Come data si è considerata quella della pubblicazione: G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto fisico al suo calco digitale*, Milano POLI.DESIGN, 2004.

² La realizzazione del modello tridimensionale del David si inserisce all'interno del programma di restauro e pulitura terminato nel novembre 2008.

³ Sistema a stima indiretta del tempo di volo con variazione dell'intensità luminosa continua (CW, *continuous wave*) secondo la modulazione della frequenza. Questo tipo di laser, benché basato su tecnologia TOF, ha un'incertezza di misura che può spingersi sino ai 16 µm (quindi paragonabile ai sistemi a triangolazione), a cui associa un *range* massimo di 60 m ed un campo visivo di 360x270° (tipico dei laser a tempo di volo), seppur mantenendo una velocità di acquisizione limitata (fino a 1000 punti/s).

UNITÀ DI RICERCA

Laboratorio Tecnologie per i Beni Culturali dell'Università di Firenze; NRC Canada. (J.-A. Beraldin, C. Atzeni, M. Seracini et al.).

ANNO

2002¹.

DESCRIZIONE

L'Adorazione dei Magi è un dipinto, ad olio su tavola, realizzato da Leonardo da Vinci tra il 1481 ed il 1482. Una pala rimasta incompiuta, delle dimensioni di 246x243 cm, attualmente conservata alla Galleria degli Uffizi (Firenze).

OBIETTIVO

Monitoraggio dimensionale, dello stato di conservazione e archiviazione digitale.

KEYWORD

Range camera a luce strutturata, modello 3D, analisi e rappresentazione multispettrale dell'opera.

STRUMENTI E METODO

- *Sistema a luce strutturata* OPTO 3D-Ranger® (OPTONET srl, Brescia) che permette di variare il *set-up* optogeometrico:

sensore CCD:	576x768 pixel;
campo visivo:	160x205 mm (fronte), 205x269 mm (retro);
risoluzione laterale:	da 0,27 mm (fronte) a 0,35 mm (retro);
risoluzione in profondità:	da 0,38 mm (fronte) a 0,57 mm (retro);
incertezza di misura ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$):	13, 9, 37 μ m (fronte); 28, 14, 47 μ m (retro).

Le configurazioni optogeometriche del sistema a proiezione sono state variate in funzione della parte da scandire, mantenendo una risoluzione maggiore (sia laterale che in profondità) per la parte dipinta rispetto al retro della pala. La parte anteriore del dipinto è stata acquisita con una risoluzione laterale di 0,27 mm ed incertezza lungo z di 0,38 mm, la parte posteriore con una risoluzione laterale di 0,35 mm ed incertezza lungo z di 0,57 mm. (cfr. RISOLUZIONE)

Allineate le singole scansioni, è stato possibile misurare le deformazioni plano-altimetriche del supporto ligneo, facendo riferimento ad un piano teorico (definito come il piano che meglio interpola la nuvola di punti).

Sul dipinto sono state condotte una serie di analisi multispettrali per immagini, realizzando una sequenza di rappresentazioni della pala (luce visibile, infrarosso a falsi colori, riflettografia IR, fluorescenza da raggi UV, radiografia), ognuna specializzata all'indagine di un particolare aspetto (deformazioni, disegno preparatorio, ...). Inoltre, dal modello 3D sono stati dedotti i profili, sia della superficie anteriore che posteriore, per la definizione quantitativa della curvatura.

RISOLUZIONE

parte anteriore	laterale (in xy):	$\Delta x, \Delta y=0,27$ mm;
	in profondità (lungo z):	$\Delta z=0,38$ mm;
	incertezza di misura:	$\sigma_x=13$ μm , $\sigma_y=9$ μm $\sigma_z=37$ μm ;
parte posteriore laterale (in xy):	laterale (in xy):	$\Delta x, \Delta y=0,35$ mm;
	in profondità (lungo z):	$\Delta z=0,57$ mm.
	incertezza di misura:	$\sigma_x=28$ μm , $\sigma_y=14$ μm $\sigma_z=47$ μm .

SOFTWARE

Non conosciuto.

PRODOTTI

Modello poligonale 3D (*mesh*) texturizzato dell'intera pala (luce visibile, infrarosso a falsi colori, riflettografia IR, fluorescenza da raggi UV, radiografia); rappresentazione multispettrale; profili (del fronte e del retro) per la definizione quantitativa dell'entità della curvatura.

PUBBLICAZIONI

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto fisico al suo calco digitale*, Milano POLI.DESIGN, 2004, pp. 245-250.

G. GUIDI, C. ATZENI, M. SERACINI, S. LAZZARI, *Painting survey by 3D optical scanning: the case of "Adorazione dei Magi" by Leonardo da Vinci*, in "Studies in Conservation", Vol. 49, n. 13, 2004, pp. 1-12.

G. GUIDI, C. ATZENI, S. LAZZARI, *3D optical scanning diagnostics for Leonardo da Vinci's "Adorazione dei Magi" conservation*, in "IV International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling" (3DIM 2003), 2003, pp. 110-115.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

F. CAMEROTA, A. NATALI, M. SERACINI, *Leonardo da Vinci. Studio per l'Adorazione dei Magi*, Argos, 2006.

SITOGRAFIA

Home page della Editech srl;

<http://www.editech.com>. (consultato il 6-8-2009)

¹ La realizzazione del modello tridimensionale del quadro fa parte della campagna d'indagini diagnostiche promosse, nel 2002, dalla Galleria degli Uffizi, allo scopo di definirne la tecnica pittorica, i materiali usati e lo stato di conservazione, per valutare l'opportunità di pulire il dipinto. La scansione tridimensionale è stata presentata nel corso del convegno *Electronic Images and the Visual Arts* (EVA), tenuto a Firenze dal 18 al 22 marzo 2002 ed organizzato dall'Università di Firenze. Il titolo della memoria è: *Three-dimensional diagnostics of painted tables by optical digital scanners: a case study, the “Adorazione dei Magi” by Leonardo da Vinci*, G. Guidi, S. Ciofi, V. Damato e C. Atzeni (Università di Firenze); S. Lazzari, (Optonet Srl, Brescia) e M. Seracini (Editech Srl, Firenze).

UNITÀ DI RICERCA

NRC Canada. (F. Blais, J.-A. Beraldin et al.).

ANNO

2004.

DESCRIZIONE

La Gioconda (1503-1506) è un dipinto ad olio su tavola di pioppo delle dimensioni di 53,4x79,4 cm, attualmente conservato al Museo del Louvre (Parigi).

OBIETTIVO

Modello 3D dettagliato per l'archiviazione digitale, il monitoraggio dimensionale e per lo studio dello stato di conservazione.

KEYWORD

Range camera a triangolazione, modello 3D con *texture* fotografica ad alta risoluzione, archiviazione digitale.

STRUMENTI E METODO

– *Range camera* a triangolazione sviluppato dal NRC (Canada), montato su guida orizzontale:

risoluzione in profondità: 10 μm ;

campo visivo: 20x4 cm.

Nella scansione della Gioconda, il gruppo di studio del *Visual Information Technology Group* del NCR Canada, si è posto tre obiettivi principali: documentare e misurare in maniera estremamente precisa la deformazione del supporto ligneo; esaminare le caratteristiche della superficie pittorica, le screpolature della pittura, le lacune superficiali e la suddivisione in pannelli; infine, monitorare lo stato di conservazione e la tecnica pittorica di Leonardo.

A tale scopo è stato sviluppato dal NRC del Canada, un *range camera* a triangolazione ad alta risoluzione ottimizzato per scandire i dipinti. La Gioconda è stata acquisita ad una risoluzione spaziale di 0,06 mm (sia lungo x che lungo y) e con un'incertezza lungo z di 10 μm . La testa di scansione è stata montata su una guida in grado di traslare orizzontalmente, digitalizzando un'area di 20x4 cm alla volta. In tal modo sono state ottenute 72 *range map* per la parte anteriore e 68 per quella posteriore. La scelta della risoluzione è stata dettata soprattutto dalla necessità di limitare i tempi di

scansione, decidendo di acquisire il *recto* con una risoluzione maggiore, mentre i lati e il *verso* con una minore, impiegando due notti: il 18 ed il 19 ottobre 2004.

Il risultato è un modello 3D estremamente preciso, tanto da apprezzare le venature del legno, le screpolature e lo spessore della pittura, cioè una replica del dipinto reale nei minimi dettagli, che permette di sostituirlo e condurre gli studi su quest'ultimo invece che sull'originale. Nel corso degli studi si è visto che è possibile misurare anche lo spessore della vernice trasparente che ricopre il dipinto e che in prima analisi ha uno spessore medio di 0,11-0,17 mm.

Applicando al modello l'ombreggiatura sintetica ed avendo cura di simulare la luce radente, è possibile esaltare le asperità della superficie, le screpolature della pittura, i contorni della figura e del paesaggio. Il dipinto è stato sottoposto ad una serie di analisi: infrarosso a falsi colori, riflettografia IR, radiografia.

RISOLUZIONE

parte anteriore	laterale (in xy):	$\Delta x, \Delta y=0,06$ mm;
	in profondità (lungo z):	$\Delta z=10$ μ m.

SOFTWARE

Non conosciuto.

PRODOTTI

Modello poligonale 3D (*mesh*) con ombreggiatura sintetica e con *texture* fotografica ad alta risoluzione; elaborati bidimensionali ottenuti dal modello 3D (rappresentazione della deformazione a falsi colori e tramite curve di livello sovrapposte al dipinto); video.

PUBBLICAZIONI

F. BLAIS, L. COURNOYER, J.-A. BERARDIN, M. PICARD, *3D Imaging from Theory to Practice: The Mona Lisa Story*, 2008.

F. BLAIS, J. TAYLOR, L. COURNOYER, M. PICARD, L. BORGEAT, G. GODIN, J.-A. BERARDIN, M. RIOUX, C. LAHANIER, *Ultra High-Resolution 3D Laser Color Imaging of Paintings: the "Mona Lisa" by Leonardo da Vinci*, in Proceedings of "VII International Conference on Lasers in the Conservation of Artworks", Madrid (Spagna), 17-21 settembre 2007.

F. BLAIS, J. TAYLOR, L. COURNOYER, M. PICARD, L. BORGEAT, G. GODIN, J.-A. BERARDIN, C. LAHANIER, M. RIOUX, *La Joconde, les mystères au coeur, Conference*, Codex Images International, C12 Editions, 2007.

L. BORGEAT, G. GODIN, P. MASSICOTTE, G. POIRIER, F. BLAIS, J.-A. BERARDIN, *Visualizing and Analyzing The Mona Lisa*, in "IEEE Computer Graphics and Applications", Vol. 27, n. 6, 2007, pp. 60-68.

F. BLAIS, J. TAYLOR, L. COURNOYER, M. PICARD, L. BORGEAT, G. GODIN, J.-A. BERARDIN, M. RIOUX, C. LAHANIER, B. MOTTIN, *More than a poplar plank: the shape and subtle*

colors of the masterpiece Mona Lisa by Leonardo, in Proceedings of “IS&T/SPIE's Annual Symposium on Electronic Imaging, Science and Technology, Videometrics IX 9E1103”, 29-30 gennaio 2007.

L. BORGEAT, G. POIRIER, J. TAYLOR, F. BLAIS, L. COURNOYER, M. PICARD, G. GODIN, J.-A. BERARDIN, C. LAHANIER, M. RIOUX, *Mona Lisa: A Montage of Scientific Images*, in Proceedings of “Science and Engineering Visualization Challenge, Second place in the Informational Graphics Category, Science”, 22 settembre 2006, pp. 1730-1735.

PUBBLICAZIONI CORRELATE

AA.VV., *Au coeur de “La Joconde”. Léonard de Vinci décodé*, Éditions Gallimard-Musée du Louvre, Parigi 2006.

SITOGRAFIA

Pagina internet del NRC Canada sul progetto relativo alla Gioconda;

<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/projects/iit/mona-lisa.html>. (consultato il 14-8-2009)

NOTA BIBLIOGRAFICA

Teoria, riferimenti

- A. DELAUNAY, *Comportamento e condizionamento*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1978, vol. III.
- R. DROZ, *Percezione*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1980, vol. X.
- U. ECO, *Vertigine della lista*, Milano Bompiani, 2009.
- U. ECO, *I limiti dell'interpretazione*, Milano Bompiani, 1990.
- H. FOCILLON, *Vita delle forme*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1987 (I ed. it. 1945; ed. or. *Vies des Formes*, Paris Librairie Ernest Leroux 1934).
- U. GALIMBERTI, *Psiche e tecne. L'uomo nell'età della tecnica*, Milano Feltrinelli, 2007.
- E. GARRONI, *Creatività*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1978, vol. IV.
- F. GIL, *Ricerca*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1981, vol. XII.
- FERNANDO GIL, *Conoscenza*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1978, vol. III.
- F. GIL, *Dato*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1978, vol. IV.
- F. GIL, *Categorie/categorizzazione*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1977, vol. II.
- G.-G. GRANGER, *Metodo*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1980, vol. IX.
- J. LE GOFF, *Documento/monumento*, in *Enciclopedia*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1978, vol. V.
- C. LÉVI-STRAUSS, *Il pensiero selvaggio*, Milano Il Saggiatore, 1996 (I ed. it. 1964; ed. or. *La pensée sauvage*, Paris Plon, 1962).
- T. MALDONADO, *Reale e virtuale*, Milano Feltrinelli, 2007 (I ed. 1992).
- U. NEISSER, *Conoscenza e realtà. Un esame critico del cognitivismo*, Bologna Il Mulino, 2000 (I ed. it. 1981; ed. or. *Cognition and Reality. Principles and Implications of Cognitive Psychology*, San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1976).
- S. VITALI, *Passato digitale. Le fonti dello storico nell'era del computer*, Milano Bruno Mondadori, 2004.

Analisi, rilievo, rappresentazione

AA.VV., *Atti del Convegno: Il Rilievo dei Beni Architettonici per la Conservazione*, Roma MG Sistemi Editoriali, 2005.

R. ARNHEIM, *La dinamica della forma architettonica*, Milano Feltrinelli, 1985 (I ed. it. 1981; ed. or. *The Dynamics of Architectural form*, Berkeley and Los Angeles-London, University of California press, 1977).

R. ARNHEIM, *Arte e percezione visiva*, Milano Feltrinelli, 1971 (ed. or. *Art and Visual Perception: a Psychology of the Creative Eye*, Berkeley and Los Angeles, University of California Press, 1954).

A. DE ROSA, A. GIORDANO, A. SGROSSO, *La Geometria nell'Immagine. Storia dei metodi di rappresentazione. Dal secolo dei lumi all'epoca attuale*, Torino UTET, 2002, vol. III.

R. DE RUBERTIS, *Il disegno dell'architettura*, Roma Carocci Editore, 2006.

A. DE SANCTIS (a cura di), *Lo spazio urbano come tema. Il caso-studio del centro antico di Cosenza*, Roma Gangemi Editore, 2004.

A. DE SANCTIS (a cura di), *Via Giostra Vecchia. Analisi e rilievi sul patrimonio edilizio ed urbano*, Soveria Mannelli Rubbettino, 2006.

M. DOCCI, D. MAESTRI, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Roma-Bari Editori Laterza, 2009.

M. DOCCI, D. MAESTRI, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Roma-Bari Editori Laterza, 1993.

E. H. GOMBRICH, *Arte e Illusione. Studio sulla psicologia della rappresentazione pittorica*, Torino Giulio Einaudi Editore, 1965 (ed. or. *Art and Illusion. A Study in the Psychology of Pictorial Representation*, Washington D. C., Trustees of the National Gallery of Art, 1959).

R. MIGLIARI (a cura di), *Geometria descrittiva. Volume II - Tecniche e applicazioni*, Novara CittàStudiEdizioni De Agostini, 2009.

R. MIGLIARI, *Metodi e tecniche della rappresentazione digitale*, in M. UNALI, *New Lineamenta*, Roma Edizioni Kappa, 2009, pp.19-31.

R. MIGLIARI (a cura di), *Introduzione alla prospettiva dinamica interattiva*, in *Prospettiva dinamica interattiva. La tecnologia dei videogiochi per l'esplorazione di modelli 3D di architettura*, Roma Edizioni Kappa, 2008, pp. 6-17.

R. MIGLIARI, *La prospettiva e Panofsky*, in "Disegnare, idee immagini", anno XVI, n. 31/2005, pp. 28-43.

F. QUICI, *Tracciati d'invenzione. Euristiche e disegno d'architettura*, Torino UTET, 2004.

N. SARDO, *La figurazione plastica dell'architettura. Modelli di rappresentazione*, Roma Edizioni Kappa, 2004.

A. SDEGNO, *Architettura e rappresentazione digitale*, Venezia Libreria Editrice Cafoscarina, 2002.

G. TESTA, A. DE SANCTIS, *Rappresentazione e architettura. Linguaggi per il rilievo ed il progetto*, Roma Gangemi Editore, 2003.

C. VERNIZZI, *Santa Maria del Quartiere a Parma: dalle rappresentazioni storiche all'analisi grafica*, in "Ikhnos. Analisi Grafica e storia della rappresentazione", Siracusa Lombardi Editore, 2008, pp. 55-76.

Tecniche range-based e image-based

B. BENEDETTI, M. GAIANI, F. REMONDINO (a cura di), *Modelli digitali 3D in archeologia: il caso di Pompei*, Pisa Edizioni della Normale, 2010.

J.-A. BERARDIN, *Basic Theory on Surface Measurement Uncertainty of 3D Imaging Systems*, in Proceedings of "IS&T, Three-Dimensional Imaging Metrology Conference", San Jose (USA), 18-22 gennaio 2009.

J.-A. BERARDIN, M. GAIANI, *Valutazione delle prestazioni di sistemi di acquisizione tipo 3D active vision: alcuni risultati*, in "DDD-Rivista trimestrale de Disegno Digitale e Design", n. 5/2003, pp. 115-128.

F. BERNARDINI, H. RUSHMEIER, *The 3D model acquisition pipeline*, in "Computer Graphics Forum", vol. XXI, n. 2/2002, pp. 149-172.

F. BLAIS, J. TAYLOR, L. COURNOYER, M. PICARD, L. BORGEAT, L.-G. DICAIRE, M. RIOUX, J.-A. BERARDIN, G. GODIN, C. LAHNANIER, G. AITKEN, *High Resolution Imaging at 50 μ m using a Portable XYZ-RGB Color Laser Scanner*, in E. BALTSAVIAS, A. GRUEN, L. VAN GOOL, M. PATERAKI (editors), *Recording, modeling and visualization of cultural heritage*, London (UK), Taylor and Francis, 2006, pp. 101-114.

F. BLAIS, *Review of 20 Years of Range Sensor Development*, in "Journal of Electronic Imaging", vol. XIII, n. 1/2004, pp. 231-243.

F. CROSILLA, S. DEQUAL (a cura di), *Laser scanning terrestre*, Udine CISM, 2006 (Collana di Geodesia e Cartografia, 8).

F. CROSILLA, R. GALETTO (a cura di), *La tecnica del laser scanning: Teoria ed Applicazioni*, Udine CISM, 2003 (Collana di Geodesia e Cartografia, 7).

B. L. CURLESS, *New methods for surface reconstruction from range images*, Stanford University 1997 (tesi di dottorato).

G. GODIN, M. RIOUX, J.-A. BERARDIN, M. LEVOY, L. COURNOYER, F. BLAIS, *An assessment of laser range measurement on marble surfaces*, in Proceedings of “V Conference on Optical 3D Measurement Techniques”, Vienna (Austria), 1-4 ottobre 2001, pp. 49-56.

L. DE LUCA, *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Palermo Dario Flaccovio Editore, 2011.

E. CHIAVONI, M. FILIPPI (a cura di), *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*, (ricerca Prin 2007, coord. naz. Mario Docci), Roma Gangemi Editore, 2011.

M. DOCCI (a cura di), *Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e dell'ambiente*, (ricerca Cofin 2002, coord. naz. Mario Docci), Roma Gangemi Editore, 2005.

J. FRYER, H. MITCHELL, J. CHANDLER (editors), *Applications of 3D Measurement from Images*, Dunbeath (UK), Whittles Publishing, 2007.

M. GAIANI (a cura di), *La rappresentazione riconfigurata. Un viaggio lungo il processo di produzione del progetto di disegno industriale*, Milano Edizioni POLI.DESIGN, 2006.

G. GUIDI, M. RUSSO, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, Milano McGraw-Hill, 2010.

G. GUIDI, J.-A. BERARDIN, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale. Dall'oggetto fisico al suo calco digitale*, Milano Edizioni POLI.DESIGN, 2004.

T. P. KERSTEN, K. MECHELKE, M. LINDSTAEDT, *Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems*, in A. GRUEN, H. KAHMEN (editors), in Proceedings of “VIII Conference on Optical 3-D Measurement Techniques”, Zurigo (Svizzera), 9-12 luglio 2007, pp. 319-327.

T. P. KERSTEN, K. MECHELKE, M. LINDSTAEDT, H. STERNBERG, *Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems*, in “Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation”, n. 4/2009, pp. 301-316.

R. MIGLIARI (a cura di), *Frontiere del rilievo. Dalla matita alle scansioni 3D*, Roma Gangemi Editore, 2001.

G. VOSSelman, H.-G. MAAS (editors), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Dunbeath (UK), Whittles Publishing, 2010.