

Ao8



*Vai al collegamento multimediale*

Antonio Agostino Zappani

# Riflessioni sul rilevamento architettonico

I mutamenti indotti dalle tecniche ottiche di misura 3D

*Presentazione di*  
Aldo De Sanctis





Aracne editrice

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

Copyright © MMXVII  
Giacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

[www.giacchinoonoratieditore.it](http://www.giacchinoonoratieditore.it)  
[info@giacchinoonoratieditore.it](mailto:info@giacchinoonoratieditore.it)

via Vittorio Veneto, 20  
00020 Canterano (RM)  
(06) 93781065

ISBN 978-88-255-0968-7

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: dicembre 2017

- 7 *Presentazione*
- 9 *Premessa*
- 11 **Capitolo 1**  
Le tecniche ottiche di misura 3D
- 1.1. *Classificazione delle tecniche ottiche di misura 3D*, 11 – 1.2. *Tecniche range-based per l'acquisizione metrica*, 15 – 1.2.1. Sistemi basati sul principio della triangolazione, 15 – 1.2.2. Sistemi basati sulla stima del tempo di volo, 22 – 1.3. *Parametri di funzionamento del laser scanner*, 24 – 1.4. *Artefatti della misura*, 31 – 1.5. *Annotazioni sull'iter di costruzione del modello poligonale*, 37 – 1.6. *Cenni sulla fotogrammetria digitale*, 46.
- 51 **Capitolo 2**  
Le applicazioni per i beni culturali. Ricognizione, riflessioni e deduzioni
- 2.1. *La ricognizione. Premesse metodologiche e struttura delle schede*, 51 – 2.2. *Riflessioni e deduzioni. Indirizzi e le linee di tendenza della ricerca*, 56 – 2.2.1. La griglia concettuale come strumento per l'analisi, 56 – 2.2.2. Metodi, tecniche e procedure, 59 – 2.2.3. La restituzione, 69.
- 81 **Capitolo 3**  
Il modello 3D e l'evoluzione dei rapporti cognitivi tradizionali
- 3.1. *Rilevamento tradizionale e nuvola di punti*, 81 – 3.2. *La trasformazione del rapporto manifattorilevatore e il capovolgimento del processo di produzione dei disegni*, 86 – 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.
- 107 **Capitolo 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*, 112 – 4.2.1. Considerazioni preliminari, 112 – 4.2.2. Prodotti di immagine, 116 – 4.2.3. I modelli 3D nella restituzione, 126 – 4.3 *Nuove opportunità grafiche per l'analisi: tre casi*, 133 – 4.3.1. La tomba delle Anatre (Parco di Veio, Roma), 134 – 4.3.2. La Rotonda di Damous-el-Karita (Cartagine), 141 – 4.3.3. La chiesa di Santa Maria Assunta (Mesoraca, Crotone), 146.

157 Schede

*Hagia Sofia (Istanbul)*, 159 – *La Sala delle Cariatidi (Palazzo Reale, Milano)*, 163 – *La Cripta di Santa Cristina (Carpignano Salentino, Lecce)*, 167 – *Digital Cathedral of Pisa*, 173 – *Il complesso architettonico del Patire (Rossano, Cosenza)*, 177 – *L'Eretteo (Atene)*, 183 – *Il Foro Civile di Pompei*, 189 – *The Digital Michelangelo Project & The Digital Forma Urbis Romae Project*, 197 – *The Digital Minerva Project*, 205 – *La "Maddalena" di Donatello*, 211 – *Il "David" di Donatello*, 215 – *L'"Adorazione dei Magi" di Leonardo da Vinci*, 219 – *La "Gioconda" di Leonardo da Vinci*, 223.

227 *Nota in forma di conclusione*

231 *Nota Bibliografica*

## Presentazione

Il volume di Antonio Agostino Zappani, *Riflessioni sul rilevamento architettonico. I mutamenti indotti dalle tecniche ottiche di misura 3D*, prodotto rielaborando i “materiali” della sua tesi di Dottorato, muove dall’idea che un rilievo d’architettura non coincide mai con la semplice riproduzione di un’opera, né con le “apparenze” che possono venire dai dispositivi *hardware* e *software* utilizzati: un rilievo ha valore per le elaborazioni che permette di realizzare ed i contenuti che è in grado di proporre; consente l’accadere della conoscenza architettonica per le verifiche, la coerenza informativa e, soprattutto, le considerazioni che l’evidenza delle restituzioni permette di formulare.

Nell’azione di rilevamento, cioè, le immagini individuano sia le modalità di presentazione che i contenuti di un’opera; modalità e contenuti che non accadono solo per l’efficienza degli strumenti o la presenza di nuovi algoritmi, ma per l’organizzazione delle immagini, le attenzioni che emergono attraverso il fare e i suggerimenti del “*linguaggio figurativo*” prescelto.

Un po’ come dire che la conoscenza che le restituzioni esprimono si verifica per l’attitudine del linguaggio figurativo di analizzare e scomporre l’architettura con elaborati indirizzati verso uno scopo; e si verifica per le possibilità della rappresentazione architettonica di tematizzare un’opera e riproporla con rappresentazioni coerenti con la sua complessità (formale, storica, costruttiva ...).

Per il tramite delle restituzioni si definisce l’intero nostro modo di considerare l’architettura; le immagini non presentano solo un’opportunità tra quelle possibili per descriverla, ma quella più piena che abbiamo per interpretarla e conoscerla.

Insieme al linguaggio figurativo ed alle restituzioni che ne conseguono, il nostro autore considera anche le “*tecniche*” oggi in uso per il rilevamento come veri e propri incentivi all’azione di studio, ovvero come “stimolatori” e “marcatori” di significato, capaci di suggerire e rendere possibili nuove occasioni di indagine: è anche per le potenzialità delle tecniche, che si realizzano serie estese di azioni analitiche e diviene agevole orientare la ricerca su aree operative del tutto inedite, non solo perché difficili da praticarsi prima, ma perché letteralmente inimmaginabili.

Nei quattro capitoli e nel ricco repertorio di schede che compongono il volume, troviamo approfondimenti importanti, teorici ed operativi insieme, sia sui nuovi metodi di *acquisizione* tridimensionale (possibilità di integrazione tra le differenti tecniche, peculiarità operative, passaggio discreto/continuo ...) che sulle modalità più efficaci di *restituzione* (generazione di modelli, *snapshot*, nuovi prodotti per il rilievo ...): nel libro si raccolgono conoscenze ed abilità nell'uso dei nuovi strumenti per il rilievo, ma soprattutto competenze nell'individuazione di modalità per l'analisi, la significazione e la comunicazione dell'architettura e, più in generale, del patrimonio culturale.

Le schede, in particolare, attraverso la comparazione e valutazione di importanti esperienze nazionali ed internazionali e la sperimentazione diretta, dimostrano come la fase di acquisizione non sia solo una successione prefissata di atti, ma un'importante opportunità per impostare il rilievo in modo coerente ai fini del risultato da raggiungere e dimostrano, altresì, come la fase restituzione individui una vera e propria strategia conoscitiva, volta ad analizzare, interpretare e comprendere l'architettura; una strategia in cui intervengono principi di natura cognitiva e percettiva (H. Neisser, G. H. Gombrich ...) e abilità, oggi, irrinunciabili nel settore disciplinare di riferimento.

Il quadro che ne viene fuori permette, in definitiva, all'autore di valutare con proprietà ed intelligenza la formidabile rivoluzione in atto nel *Rilievo dell'Architettura* (il *modello* come prodotto alternativo a quello del rilevamento tradizionale, come *realtà* alternativa ...), ma anche i problemi da tenere presenti per evitare che l'attività di rilevamento scada su percorsi logicamente ininfluenti e generi restituzioni, più per le circostanze esecutive e la facilità produttiva dei nuovi sistemi informatici, che per le necessità e l'utilità della ricerca stessa.

## 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, di alcune esperienze di ricerca sviluppate, sia in campo nazionale che internazionale, al fine di conoscere lo "stato dell'arte" del settore. In questo scritto proponiamo una classificazione estesa all'intero campo dei beni culturali (manufatti archeologici e architettonici, statue e dipinti) in modo da ampliare e diversificare la nostra ricognizione con applicazioni che presentano elementi di significatività e originalità trasferibili, anche, all'ambito architettonico. Sulla scorta di tale ricognizione è possibile delineare un quadro conoscitivo, concettualmente fondato sulle questioni di metodo, sulle attuali procedure operative e sulle nuove opportunità di restituzione.

Le informazioni dedotte dalle esperienze selezionate, riorganizzate 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 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 approfondito le tecniche ottiche di misura 3D, studiandone vantaggi, limiti, principi di funzionamento, 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 pre-*

*siede 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 informa, 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 ricerca grafica impiegate per favorire situazioni sia di interpretazione che di conoscenza. 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.

## 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 e le *mesh* da esse derivate, 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, ecc. Queste tecniche sfruttano la radiazione luminosa per acquisire i dati metrici e gli aspetti colorimetrici delle superfici e dei volumi di un'architettura (o di un oggetto in genere), senza bisogno di alcun contatto fisico con il misurato, "valutando" la quota di energia elettromagnetica riflessa dalla superficie.

A seconda dell'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 riceve<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> 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*, piuttosto che  *metodo*, anche questo non infrequente in letteratura, poiché il suo spettro di significati racchiude

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 con altri dispositivi (ad esempio, i sistemi CMM<sup>2</sup>), 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.

Al primo gruppo, cioè alle tecniche attive (altrimenti dette *range-based modeling*, RBM), appartengono tutti quei sistemi che utilizzano una luce opportunamente codificata<sup>3</sup> per acquisire le coordinate spaziali di una superficie (e, se dotati di fotocamera, anche quelle colorimetriche). Gli strumenti che utilizzano una tecnica 3D attiva vengono comunemente detti *range camera* e, in particolare, *laser scanner 3D* quei sistemi che si basano sul *laser*<sup>4</sup>.

gli strumenti, il metodo e le procedure.

<sup>2</sup> 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 contenuta velocità di misura, se rapportata alle tecniche ottiche di misura 3D;
- l'impossibilità di effettuare misure nel caso di particolari articolazioni spaziali;
- 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 (una superficie flessibile che si abbassa sotto la pressione imposta, rende impossibile la determinazione della geometria).

Esistono anche sistemi CMM senza contatto, in cui il sensore di misura è costituito da una *range camera*, montata su un braccio meccanico o azionata manualmente. Questa configurazione consente di superare alcuni dei limiti sopra elencati.

<sup>3</sup> La luce codificata è caratterizzata da un contenuto informativo conosciuto dal sensore, a differenza della luce ambientale diffusa, che non ha elementi di riconoscibilità.

<sup>4</sup> 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), usualmente monocromatica (consistente di una singola lunghezza

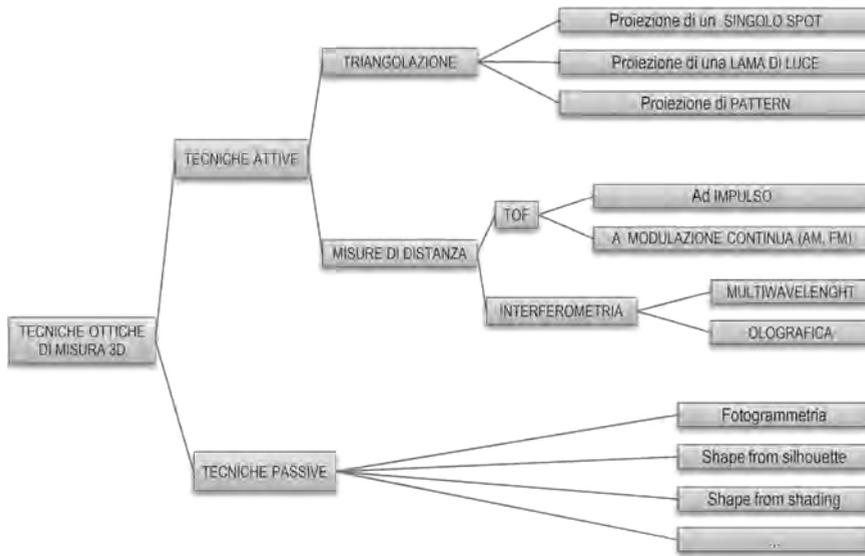


Figura 1.1. Classificazione delle tecniche ottiche di misura 3D.

Nelle tecniche passive (dette anche *image-based modeling*, IBM), la luce ambientale riflessa dagli oggetti, viene catturata ed utilizzata per ottenere i dati di carattere geometrico e cromatico delle superfici da immagini bidimensionali.

La fotogrammetria digitale è un esempio di tecnica che utilizza le immagini fotografiche per ricostruire la geometria e l'apparenza cromatica 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 tridimensionali, possono essere ottenute, sia manualmente che automaticamente, tramite i punti omologhi presenti nelle due fotografie.

Le caratteristiche dell'oggetto (dimensioni, articolazione volumetrica e spaziale, forme geometricamente complesse, peculiarità della superficie ...), le contingenze del sito (accessibilità ...) e dell'ambiente di lavoro (distanza di scansione ...), in-

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.

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.

sieme 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 sintetico, possiamo dire che:

- i *sistemi a triangolazione* sono comunemente utilizzati per acquisire limitati volumi di misura e, di conseguenza, sono adatti per oggetti di piccola/media dimensione ed elevato dettaglio (statue, bassorilievi, capitelli, dipinti ...). Questi sistemi danno luogo ad accuratezze elevate (fino a raggiungere 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 (architetture, siti archeologici ...), consentono di raggiungere 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, con accuratezze micrometriche, campionamenti molto 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 profondità di campo compresa tra qualche millimetro a qualche decina di millimetri e una distanza di lavoro, lungo  $z$ , di alcune decine di millimetri);
- i *sistemi a silhouette* definiscono le superfici mediante una serie di fotografie dell'oggetto, estrapolando da queste le *silhouette*. Sono sistemi dai costi contenuti, adatti per scandire artefatti di piccole dimensioni con basse accuratezze;
- i *sistemi shape from shading* utilizzano diverse riprese fotografiche per ottenere le geometrie, sfruttando la variazione di luminosità della superficie;
- 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/archeologico 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 per rilevamenti, sia ad alta che a bassa risoluzione, con costi contenuti rispetto ai sistemi a triangolazione e a tempo di volo.

Questa ricognizione sintetica, mirata ad analizzare le peculiarità dei sistemi di acquisizione, evidenzia che:

- un solo sistema, o una sola tecnica, non copre tutti i casi pratici e le necessità che possono presentarsi in un rilevamento architettonico, poiché non riesce ad operare efficacemente con oggetti piccoli e ricchi di dettagli e con strutture a scala architettonica;
- i sistemi a triangolazione, quelli a tempo di volo e la fotogrammetria digitale *close range*, sono i più appropriati per l'acquisizione 3D di manufatti architettonici, di siti archeologici e dello spazio urbano.

Pertanto, nel prosieguo dello scritto, approfondiremo le due tecniche attive di acquisizione 3D maggiormente utilizzate nell'ambito del rilevamento architettonico e urbano, ovverosia i *sistemi a triangolazione* e *a tempo di volo*; allo stesso tempo, accenneremo alla fotogrammetria digitale *close range*, che può essere considerata un'ulteriore tecnica in grado di integrare le tecniche attive ed anche di proporsi, in determinate situazioni, come valido sostituto<sup>5</sup>.

## 1.2. Tecniche *range-based* per l'acquisizione metrica

### 1.2.1. *Sistemi basati sul principio della triangolazione*

Gli strumenti basati sulla triangolazione sfruttano l'omonimo principio, la cui formulazione si deve al matematico e cosmografo fiammingo Gemma Frisius,

<sup>5</sup> 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 (se necessario), a quali dei due sistemi ci riferiamo; mentre, escludiamo i sistemi basati sull'interferometria che, per le loro peculiarità,

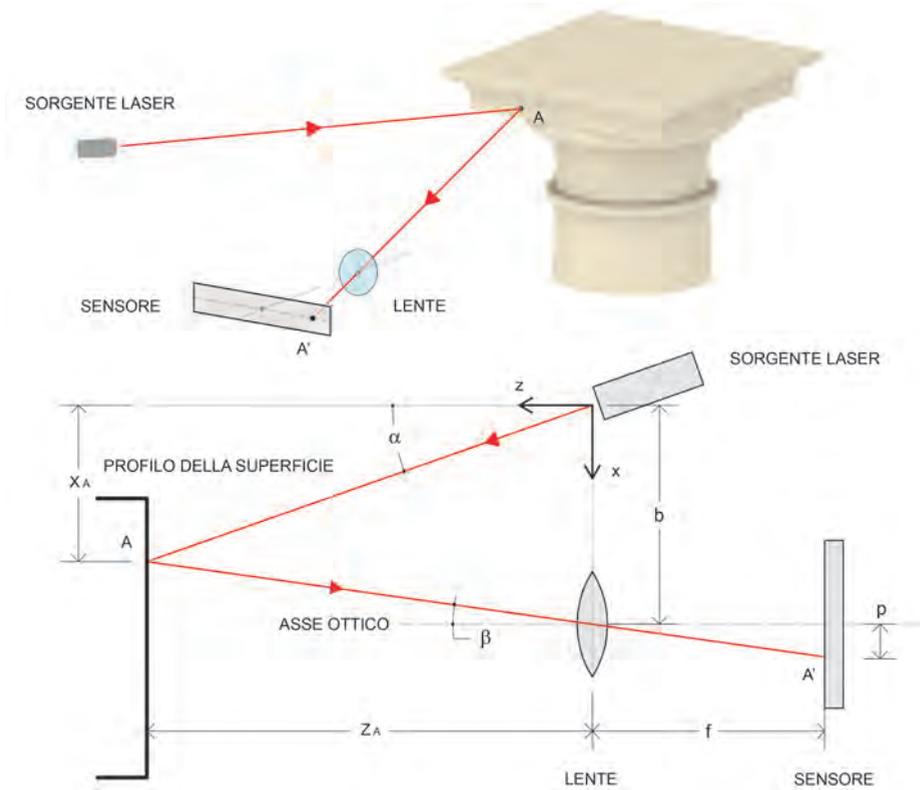


Figura 1.2. Schema di una range camera basata sul principio della triangolazione con proiezione di un singolo spot laser.

che lo introdusse nel XVI secolo, come metodo per l'individuazione esatta delle località geografiche<sup>6</sup>.

Il principio permette di risalire alle coordinate dei vertici di un triangolo, conoscendo uno dei lati (base della triangolazione) e i due angoli azimutali compresi tra le direzioni uscenti dai due vertici della base (angoli di proiezione e di ripresa).

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<sup>7</sup>.

non sono utilizzati nel campo architettonico. Inoltre, usiamo la dicitura tecniche passive (o *image-based*, o *image-based modeling*), come sinonimo di fotogrammetria digitale e, in particolare, di fotogrammetria *close range*.

<sup>6</sup> La triangolazione viene trattata da Frisius (1508-1555) nel suo *Libellus de locorum describendorum ratione*, pubblicato come appendice all'edizione del *Cosmographicus liber* di Pietro Apiano stampata ad Anversa nel 1533.

<sup>7</sup> Uno dei primi articoli che descrive un sistema per l'acquisizione delle coordinate tridimen-

Nel caso in esame, la sorgente *laser* produce un raggio che, incidendo sulla superficie in un punto  $A$ , viene riflesso<sup>8</sup> e catturato da un sensore d'immagine CCD o CMOS<sup>9</sup>. Il percorso del raggio materializza i due lati di 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; mentre la distanza tra questi ultimi due, che costituisce il terzo lato del triangolo, è prefissata e viene denominata *baseline* ( $b$ )<sup>10</sup>.

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:

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

$$z_A = b \cdot f / (p + f \cdot \tan(\alpha)) \quad (1.2)$$

Se il sistema è calibrato si conoscono a priori, sia l'inclinazione  $\alpha$  della sorgente luminosa (angolo di proiezione) che la *baseline*, mentre l'angolo di ripresa  $\beta$  si ottiene, stimando la misura del disassamento  $p$  e conoscendo la distanza focale  $f$ , mediante la seguente formula:

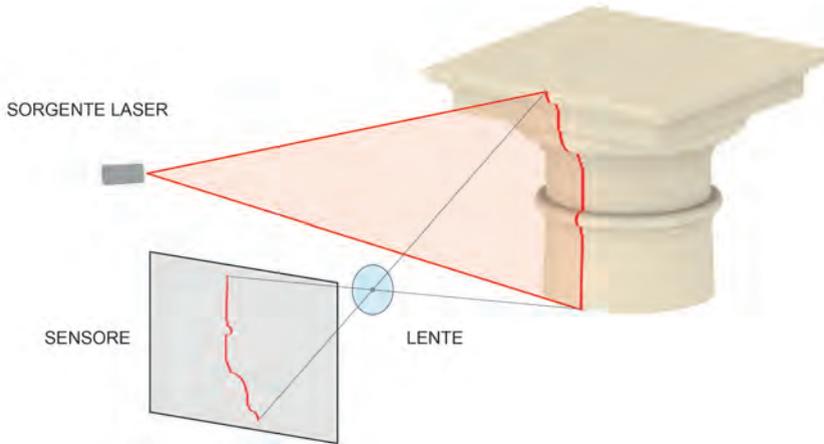
$$\tan(\beta) = p / f \quad (1.3)$$

sionali, basato sulla triangolazione con proiezione di un singolo *spot laser*, risale al 1968 (FORSEN G.E., *Processing Visual Data with an Automaton Eye*, in *Pictorial Pattern Recognition*, Washington D. C. Thompson Book Co., 1968, pp. 471-502).

<sup>8</sup> 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.

<sup>9</sup> In questo caso, il sensore può essere monodimensionale.

<sup>10</sup> In un sistema a triangolazione, il rapporto  $z/b$  influenza la precisione della misura. Solitamente tale rapporto varia tra 1 (buona precisione) e 4-5 (scarsa precisione). È comune il rapporto 2-3, cioè un valore intermedio di questo intervallo.



**Figura 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*).

Se invece di un singolo *spot laser*, il sistema consente di proiettare una serie di *spot* allineati a formare un segmento luminoso, otteniamo una lama di luce e, in questo caso, si parla di *range camera a lama di luce laser* (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, mediante il quale si acquisisce l'intero profilo dell'oggetto.

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  $\beta$  e verticale  $\gamma$  con le seguenti formule:

$$\tan(\beta) = p_x / f \quad (1.4)$$

$$\tan(\gamma) = p_y / f \quad (1.5)$$

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

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

Il sistema a singolo *spot* acquisisce le coordinate  $(x, z)$  di un punto, ne consegue che 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; pertanto, la volumetria di un oggetto può essere ricostruita imprimendo 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 descritti rappresentano dei paradigmi iniziali utili per illustrare il principio di funzionamento degli *scanner* a triangolazione, ma attualmente, lo sviluppo 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*; nella diminuzione della dipendenza dalla luce ambientale e dai riflessi (Fig. 1.4d).