

BIBLIOTECA  
PO: B4-34 (2001)  
Archivio

# Tecnologie 3D Scanning Introduzione e Valutazione Comparativa

C. Montani, C. Rocchini, R. Scopigno<sup>1</sup>  
Visual Computing Group  
Istituti CNUCE ed IEI <sup>2</sup>  
Consiglio Nazionale delle Ricerche, C.N.R., Pisa, Italy

October 10, 2001

<sup>1</sup>Email: montani@iei.pi.cnr.it, rocchini@iei.pi.cnr.it, roberto.scopigno@cnuce.cnr.it

<sup>2</sup>Area della Ricerca CNR di Pisa, Via G. Moruzzi 1, 56124 Pisa ITALY

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Tecnologie 3D scanning: pre-requisiti . . . . .	1
1.2	I dispositivi per 3D scanning . . . . .	2
1.3	Il pipeline di acquisizione . . . . .	9
1.4	L'acquisizione del colore . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Tecnologie 3D scanning</b>	<b>16</b>
2.1	Sistemi laser . . . . .	16
2.2	Sistemi a luce strutturata . . . . .	19
2.3	Sistemi a silhouette . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Sistemi 3D scanning</b>	<b>26</b>
3.1	Sistemi laser . . . . .	28
3.1.1	Cyberware . . . . .	28
3.1.2	Minolta . . . . .	29
3.1.3	Arius3D Inc. . . . .	31
3.1.4	3D Scanners: ModelMaker . . . . .	33
3.1.5	Polhemus: FastScan . . . . .	34
3.1.6	Vitana Inc.: ShapeGrabber . . . . .	35
3.1.7	Laser Design Inc.: Surveyor PS-Series . . . . .	37
3.1.8	Altri sistemi laser . . . . .	38
3.2	Sistemi a luce strutturata . . . . .	41
3.2.1	InSpeck: 3D Capturor . . . . .	41
3.2.2	Optonet: Opto 3D-Ranger . . . . .	42
3.2.3	RSI: DigiScan 2000 . . . . .	43
3.2.4	Steinbichler: Comet . . . . .	44
3.2.5	VCGScanner [CNR] . . . . .	45
3.2.6	EOIS: Handy . . . . .	47
3.2.7	Altri sistemi a luce strutturata . . . . .	48
3.3	Sistemi a silhouette . . . . .	52
3.3.1	Dimension3D: 3D ScanBook . . . . .	52
3.3.2	Altri sistemi a silhouette . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Valutazioni Comparative e Conclusioni</b>	<b>55</b>
4.1	Criteri e vincoli per una scelta tecnologica . . . . .	55
4.2	Conclusioni . . . . .	57

### Abstract

Il documento presenta i risultati della prima fase dell'Intervento 3 (*Modellazione 3D di oggetti storico-artistici*) del Progetto Parnaso *Ecumene: strumenti per la diffusione telematica di conoscenze sul patrimonio storico-artistico ed archivistico della Chiesa Cattolica in Italia*. Esso fornisce sia una introduzione alle tecniche 3D scanning che una descrizione e valutazione comparativa dei sistemi disponibili sul mercato.

Il documento è organizzato nelle seguenti sezioni. Il primo capitolo presenta una introduzione alle metodologie di acquisizione automatica ed una classificazione delle tecnologie esistenti. Il capitolo successivo presenta più in dettaglio i principi costruttivi di base di tre particolari tecnologie di acquisizione: scanner laser, scanner ad emissione di luce strutturata e ricostruzione per silhouette; la scelta di analizzare in dettaglio solo queste tre classi è legata ai requisiti specifici dell'applicazione di riferimento, ossia l'acquisizione di oggetti d'arte a piccola e media scala. Il terzo capitolo contiene una rassegna delle caratteristiche di alcuni dispositivi commerciali; anche in questo caso sono presentati solo i dispositivi che ricadono nelle tre classi precedentemente descritte. L'ultimo capitolo contiene infine una valutazione comparativa dei sistemi presentati ed alcune considerazioni conclusive.

**CR Descriptors:** I.3.5 [Computer Graphics]: Computational Geometry and Object Modelling - *Curve, surface, solid and object representation*; I.3.6 [Computer Graphics]: Methodology and Techniques.

**Additional Keywords:** Automatic shape acquisition, 3D scanning, range images, texture mapping.

# Chapter 1

## Introduzione

Il poter disporre di modelli digitali tridimensionali che rappresentino fedelmente la forma e le caratteristiche di colore e tessitura di beni artistici (sculture, reperti, monili, etc.) si sta rivelando di grande importanza in un numero sempre crescente di applicazioni: dallo studio approfondito delle opere alla catalogazione iconografica, dalla pianificazione del restauro alla creazione di musei o visite virtuali, dalla ricostruzione assistita di reperti archeologici alla produzione di copie per scopi conservativi o divulgativi.

Alcune recenti esperienze di acquisizione 3D effettuate nel contesto dei Beni Culturali (BBCC) hanno svolto un'importante opera di divulgazione delle potenzialità di alcune innovative tecnologie informatiche. Un possibile esempio è il Progetto Digital Michelangelo della Stanford University [21], nell'ambito del quale è stata effettuata la scansione digitale 3D di alcune statue di Michelangelo, conservate dal Museo Gallerie dell'Accademia di Firenze, o il progetto della IBM relativo all'acquisizione di una delle Pietà di Michelangelo, anch'essa conservata a Firenze [33]. Entrambi i progetti hanno fatto uso di dispositivi 3D scanning: nel primo caso si è trattato di un sistema laser, mentre nel secondo di un sistema a luce strutturata (vedremo nelle seguenti sezioni una breve classificazione della tecnologia hardware esistente).

Gli strumenti in uso in ambiti industriali per l'*acquisizione automatica* di forme (*reverse engineering*) presentano limitazioni che li rendono molto spesso non propriamente adatti ad un uso orientato al patrimonio artistico. Molto spesso, infatti, è rilevata soltanto la forma e non il colore dell'oggetto, oppure la risoluzione di scansione è troppo bassa oppure è necessario rendere opaco l'oggetto prima dell'acquisizione oppure, ancora, viene prodotto un modello incompleto ed approssimativo (che richiede successivamente l'uso di tecniche CAD).

Un ulteriore fattore che rende spesso non facile introdurre l'uso di tecnologia 3D scanning nel settore BBCC è legato all'alto costo della maggior parte dei dispositivi esistenti in commercio, ed alla loro complessità di uso.

### 1.1 Tecnologie 3D scanning: pre-requisiti

Le metodologie proposte per l'acquisizione semi-automatica delle caratteristiche di forma e colore di oggetti tridimensionali sono molteplici. Una intensa attività

di ricerca, sia accademica che industriale, ha prodotto un ventaglio molto ampio di possibili metodologie.

Analogamente a quanto accade in altri campi, anche nel caso dell'acquisizione automatica non esiste una metodologia che possa essere applicata in modo indifferenziato a qualsiasi problema di acquisizione. Le caratteristiche dell'oggetto da acquisire infatti influenzano pesantemente tale scelta. Tra queste possiamo elencare:

- complessità di forma dell'oggetto (numero di componenti, presenza di buchi passanti o sezioni molto concave, etc);
- caratteristiche della superficie dell'oggetto (riflettività, trasparenza, deformabilità, etc);
- dimensione spaziale;
- trasportabilità ed accessibilità del manufatto;
- necessità di acquisire attributi (quali ad esempio il colore).

Inoltre, va considerata anche la specificità dell'applicazione che si prevede per il modello acquisito:

- grado di accuratezza richiesto al modello digitale;
- complessità di descrizione del modello digitale ottimale per l'applicazione di riferimento;
- compatibilità del tempo e costo di acquisizione con il budget di progetto.

Le caratteristiche dell'oggetto da acquisire, le esigenze progettuali ed i vincoli esterni guideranno volta per volta la scelta del dispositivo ideale.

## 1.2 I dispositivi per 3D scanning

Il 3D scanning, come suggerisce il termine stesso, rappresenta l'omologo tridimensionale della diffusissima scansione 2D. L'obiettivo della scansione 3D scanning è la creazione di un modello 3D digitale che rappresenti fedelmente le caratteristiche di forma, colore e tessitura dell'oggetto acquisito. Mentre però nel caso bidimensionale con una semplice passata dello scanner si ottiene una immagine digitale fedele all'originale, nel caso tridimensionale il processo è ben più complesso. La tecnologia hardware e software di scansione 3D, pur se molto progredita negli ultimi anni, non consente di parlare di *fotografia 3D*: non bastano uno o più *scatti* del dispositivo di acquisizione per ottenere un modello 3D. Come accennato in precedenza, ancora insostituibile risulta l'intervento dell'operatore nelle diverse fasi dell'acquisizione, fasi che vanno dalla scelta del dispositivo al suo corretto posizionamento, all'input dei dati grezzi, alla ricostruzione del modello digitale completo, alla sua manipolazione per renderlo compatibile con le applicazioni di riferimento, etc.

Nonostante queste evidenti limitazioni, molti passi avanti sono stati fatti nei diversi aspetti del 3D scanning e molteplici sono attualmente le tecnologie disponibili. Cercheremo in queste sezioni di fornire un quadro di sintesi

dell'esistente in modo da permettere al lettore interessato di districarsi facilmente nel settore.

Introduciamo innanzitutto quelle che potrebbero essere le caratteristiche di un ideale sistema di scansione automatica:

- generazione il più possibile semi-automatica di un risultato veramente tridimensionale. Con ciò si vogliono differenziare in modo netto le tecniche di scansione 3D dalle tecniche che permettono di ottenere simulazioni della tridimensionalità, come ad esempio le tecniche di tipo image-based modeling (vedi Panoramic Images o Quick Time VR [8]);
- accuratezza del processo di rilievo (o campionamento) della geometria;
- velocità del processo di scansione (e possibilmente produzione di un modello digitale completo, e non di una singola range map, cioè di una particolare vista di parte dell'oggetto);
- facilità di uso;
- facilità di spostamento dell'attrezzatura, o di uso in contesti caratterizzati da spazi di manovra ristretti;
- sicurezza operativa, sia per l'operatore che per gli oggetti da acquisire;
- capacità di acquisizione delle caratteristiche non-geometriche dell'oggetto (ad esempio il colore);
- costo non eccessivo.

La tecnologia 3D scanning è evoluta in modo considerevole nel corso degli ultimi anni, così come le applicazioni in grado di utilizzare in modo effettivo i dati prodotti. Una rassegna del settore, che copre sia gli aspetti software che hardware, è stata proposta in alcuni recenti articoli scientifici [2, 14].

Proviamo quindi a classificare i sistemi o le tecnologie presenti in letteratura. Un prima possibilità si basa sulla caratterizzazione del tipo di dati prodotti (Figura 1.1). Tutti i sistemi producono informazione geometrica, ma potremmo differenziare quelli che producono un sampling puntiforme (un unico campione alla volta, come molti sistemi di tipo industriale basati su tastatori), uno stream lineare di campioni, o direttamente una matrice  $n*m$  di campioni, quest'ultima in genere detta *range map*. Una classe particolare è quella che produce direttamente un campionamento volumetrico (ossia un volume  $n*m*p$  di punti di campionamento), come ad esempio le comuni apparecchiature di scansione usate in ambito medico o industriale (TAC, risonanza magnetica, etc.). Dato il particolare contesto applicativo di riferimento per questa trattazione (il settore Beni Culturali), le metodologie di tipo volumetrico non verranno prese in considerazione nel seguito.

Un modo alternativo di classificare i sistemi esistenti non parte dalla tipologia dei dati prodotti, bensì dalle specifiche caratteristiche del metodo adottato (Figura 1.2). In questa tassonomia un primo livello di caratterizzazione divide i sistemi in **contact** (che richiedono contatto fisico con la superficie dell'oggetto, come ad esempio i sistemi tastatori) e sistemi di tipo **non-contact**.

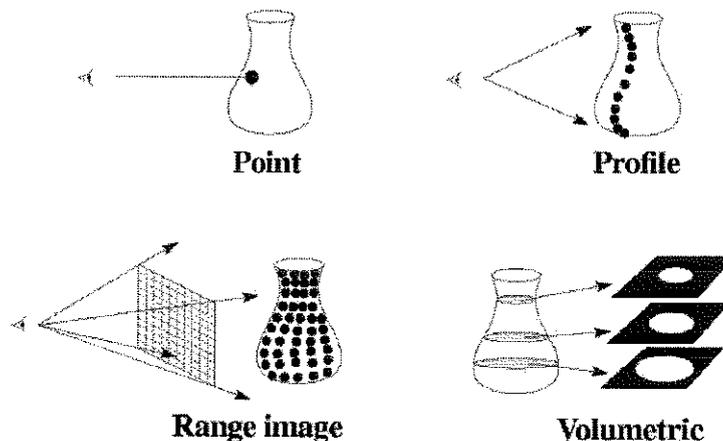


Figure 1.1: Differenti tipologie di dati prodotte dai diversi sistemi di acquisizione automatica tridimensionale (per gentile concessione di Brian Curless, Siggraph 2000 Course Notes).

Non tratteremo i sistemi **contact** in quanto non sono in grado di acquisire le informazioni colore ed inoltre sono inadatti ad applicazioni nel settore dei BBCC dove il contatto del manufatto con il dispositivo di scansione è assolutamente da evitare. E' opportuno comunque sottolineare che la tecnologia dei cosiddetti tastatori **CMM** ha compiuto passi giganteschi negli ultimi anni e che non sono infrequenti digitalizzatori meccanici molto precisi (grazie all'impiego di sensori ottici digitali negli snodi) e con velocità di campionamento elevate (fino a 1000Hz).

I sistemi **non-contact** possono essere suddivisi in sistemi **Reflective** e **Transmissive** (Figura 1.2). I sistemi **Transmissive** (ad esempio i dispositivi per tomografia computerizzata) non restituiscono un modello geometrico della superficie dell'oggetto in esame ma un volume di dati da cui la superficie stessa può essere estratta. A fronte di questa caratteristica che si dimostra positiva nella pratica di creazione di un modello digitale, i sistemi trasmissivi si rivelano tuttavia una tecnologia impraticabile per una campagna di acquisizione di beni culturali in quanto presentano costi esorbitanti, assenza delle informazioni colore, necessità di sottoporre gli oggetti a bombardamenti di raggi X (e quindi di muoverli dalla loro sede), impossibilità di acquisire oggetti metallici, etc.

Tra i sistemi **Reflective** possiamo operare l'ulteriore suddivisione in sistemi **non-optical** e sistemi **optical**.

I dispositivi a ultrasuoni e magnetici fanno parte dei sistemi **non-optical** e presentano, purtroppo alcune importanti limitazioni. Il funzionamento dei dispositivi a ultrasuoni si basa sulla trasmissione di onde sonore. Poiché la velocità del suono dipende anche dalle condizioni di pressione, di temperatura e di umidità dell'aria è evidente che la corretta misurazione effettuata con questi strumenti richiede ambienti non ricreabili nei musei o nei laboratori di restauro. Per un motivo analogo abbiamo trascurato, nella nostra analisi, i sistemi mag-

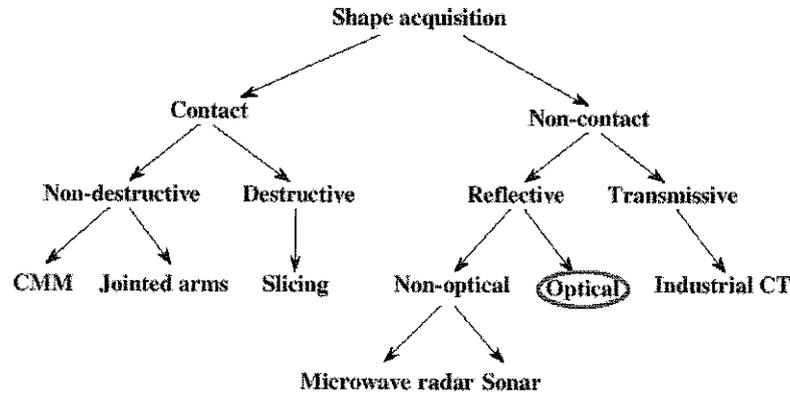


Figure 1.2: Classificazione dei sistemi di acquisizione automatica tridimensionale, in accordo con [14].

netici; il campo magnetico creato da questi dispositivi può subire sensibili distorsioni in presenza di oggetti metallici quali sedie o scrivanie. Oggetti metallici non possono evidentemente essere acquisiti con questa categoria di strumenti

La classe di sistemi su cui abbiamo concentrato la nostra attenzione è quindi quella dei sistemi che fanno uso di un approccio **ottico**, ossia in cui le informazioni sulla forma sono in qualche modo derivate dal modo in cui l'oggetto stesso si manifesta visivamente o dal modo in cui riflette la luce incidente.

In termini per ora del tutto generali, possiamo elencare alcuni aspetti caratterizzanti delle *tecnologie ottiche*. Tra i *vantaggi* possiamo senza dubbio elencare:

- Non richiedono il contatto con la superficie dell'oggetto, sono per definizione non-distruttive;
- Economiche (vale in genere per i sistemi a bassa accuratezza);
- Sicure (ma si deve tenere conto delle possibili collisioni tra oggetto e scanner, in particolare ove si faccia uso di un sistema servo-assistito per la movimentazione del sistema di scansione nello spazio)
- Veloci nell'acquisizione.

mentre tra gli *svantaggi*:

- Costose (nel caso dei sistemi ad alta accuratezza)
- Per definizione, permettono di acquisire solo le proprietà (di forma o colore) della superficie dell'oggetto; ove sia necessario avere dati anche sul volume (ad es. spessore del guscio bronzeo di una statua) sarà necessario ricorrere a tecnologie di tipo volumetrico, come ad esempio quelle trasmissive;
- La qualità dei risultati dipende fortemente dalle caratteristiche di riflettività della superficie: trasparenza, brillantezza, repentine variazioni di colore, opacità (nessuna luce riflessa, dispersione superficiale (si veda ad esempio il comportamento di marmi irradiati da luce laser), inter-riflessioni.

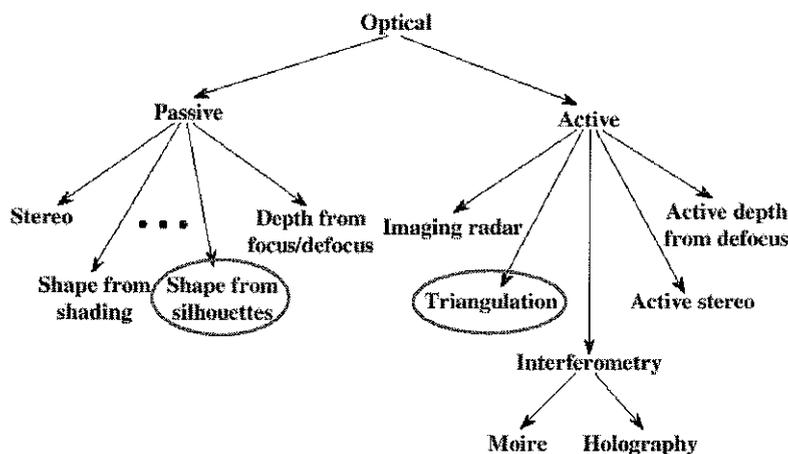


Figure 1.3: Classificazione dei sistemi di acquisizione automatica tridimensionale, in accordo con [14] (segue dalla precedente).

La sottoclasse dei sistemi ottici può a sua volta essere suddivisa in **sistemi ottici attivi** e **sistemi ottici passivi** (Figura 1.3).

Per sistemi **attivi** si intendono tutti quei sistemi in cui l'oggetto è sottoposto a qualche tipo di sorgente di illuminazione strutturata e l'informazione geometrica si ricava dall'osservazione di come un particolare pattern di luce viene distorto nella riflessione sulla superficie dell'oggetto. Questi metodi sono in genere basati sul processo di triangolazione (note le posizioni relative dell'emettitore e del sensore, si ricostruisce per triangolazione la posizione del punto della superficie da cui viene riflessa la luce). Un esempio di strumenti appartenenti a questa classe sono sia i sistemi *a luce laser* (Sezione 2.1) che quelli *a luce strutturata* (Sezione 2.2).

I sistemi ottici attivi fanno uso di un *emettitore*, o sorgente, che proietta una qualche forma di radiazione luminosa sulla superficie dell'oggetto da acquisire, e da un *ensore*, che tipicamente è un device CCD che acquisisce immagini dell'oggetto sottoposto ad illuminazione. Nella maggior parte dei casi l'informazione sulla geometria dell'oggetto è derivata per triangolazione (vedere un esempio in Figura 1.4), conoscendo la posizione relativa della coppia emettitore-sensore e l'immagine riflessa dalla superficie dell'oggetto del pattern luminoso noto [4]. Le quantità in gioco sono mostrate in Figura 1.5; la profondità  $Z$  di ogni punto osservato può essere determinata come:

$$Z = \frac{f \cdot L}{x + f \cdot \tan(\theta)}$$

L'emettitore può produrre sia luce coerente (e.g. un fascio laser) che luce incoerente (un qualsiasi pattern luminoso). In entrambi i casi, il pattern emesso può essere: puntiforme (point-wise), formato da uno o più strisce luminose (stripe-wise), o qualsiasi altro pattern.

Differenti tecnologie sono state proposte per la produzione del pattern: emettitori laser, proiettori custom di luce multispettro (che in genere filtrano la

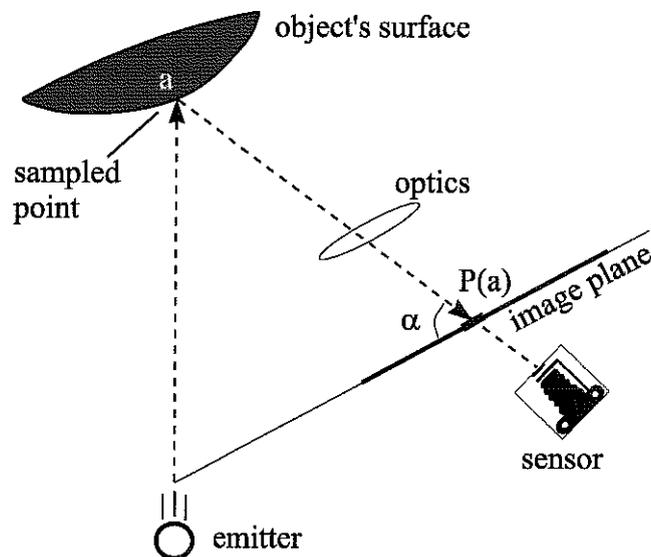


Figure 1.4: Schema esemplificativo di scanner ottico. La posizione del punto osservato ( $a$ ) è ottenuta per semplice triangolazione a partire dalla proiezione  $P(a)$  di  $a$  sul piano immagine e dalle posizioni e orientamenti noti del sistema emettitore - sensore.

radiazione per mezzo di un filtro di precisione, ottenuto ad esempio per fotolitografia), comuni proiettori di diapositive, e finalmente videoproiettori digitali. Un marcato vantaggio di questi ultimi è la loro grande flessibilità: un videoproiettore ci dà infatti la possibilità di generare un numero virtualmente infinito di diversi pattern.

La scelta del pattern è ovviamente uno dei punti critici del sistema. Il pattern dovrebbe soddisfare una serie di caratteristiche: non dovrebbe essere alterato dalle caratteristiche riflettive della superficie dell'oggetto (ad es. un pattern formato da strisce colorate può essere riflesso in modo molto differenziato a seconda della colorazione dell'oggetto stesso); dovrebbe rendere il più semplice possibile il suo riconoscimento nell'immagine acquisita dal sensore, e nello stesso tempo garantire precisione; dovrebbe permettere una accurata ricerca e riconoscimento delle sue componenti costitutive (ad es. punti o linee), ed anche permettere una semplice ricostruzione del loro ordine spaziale nel caso che si usino pattern costituiti da più componenti distribuite nello spazio (ad esempio insiemi di linee).

Il metodo di ricostruzione è generalmente condizionato dalle caratteristiche del pattern adottato. La soluzione più semplice, adottata in verità dalla maggior parte dei dispositivi a luce laser, consiste nel proiettare sull'oggetto un singolo piano di luce che traccia un singolo profilo sulla superficie in acquisizione. Altre soluzioni tendono ad accelerare il processo di scansione proiettando contemporaneamente più fasci o piani di luce (ad esempio serie di strisce verticali od orizzontali). Nel caso di pattern multipli, tuttavia, la ricostruzione risulta generalmente più complessa rispetto alla ricostruzione da singolo pattern. Infatti, la sequenza spaziale con cui i pattern sono rilevati sul piano immagine non cor-

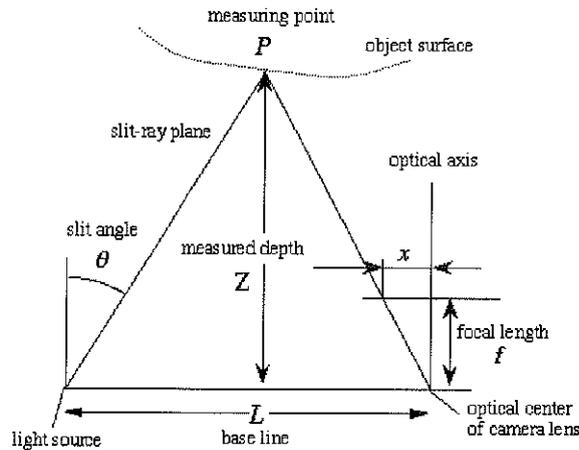


Figure 1.5: Le quantità che intervengono nella determinazione della profondità reale di un punto.

risponde necessariamente alla sequenza con cui sono stati proiettati in quanto dipende dalla topologia e dalla curvatura locali della superficie in esame. Diretta conseguenza di questa complessità sono le possibili ambiguità che possono insorgere nel riconoscimento di pattern complessi (si pensi, ad esempio, a serie di strisce verticali). Vedremo più in dettaglio questa problematica nella sezione relativa ai metodi basati su luce strutturata (Sezione 2.2).

Per definizione, il processo di rilevamento basato sul principio della triangolazione ha come presupposto il posizionamento del emettitore e del sensore a distanza tale da formare un angolo di ripresa di 20-30 gradi rispetto all'ipotetico oggetto da riprendere. In conseguenza, se l'oggetto da riprendere non è un semplice piano ortogonale al sistema di acquisizione ma un oggetto dalla superficie sculturata, potranno esistere delle zone di superficie che o non saranno visibili all'emettitore o non saranno visibili al sensore, e sulle quali quindi il sistema non sarà in grado di effettuare alcun campionamento della geometria (vedi Figura 1.6). In questo caso (che si presenta frequentemente nell'uso reale dei dispositivi a triangolazione ottica) sarà necessario operare più riprese, da direzioni diverse, della stessa zona di superficie per ridurre o annullare le zone non campionate.

Una particolare classe di sistemi ottici attivi è quella dei cosiddetti *laser radar*, o *laser a tempo di volo* (time of flight). Questi sistemi usano un emettitore di luce laser modulata in intensità (spot light) e misurano il tempo trascorso tra l'emissione del segnale e la ricezione dell'impulso riflesso. Sono sistemi orientati alla scansione di oggetti di grandi dimensioni (da pochi metri fino a decine di metri) e forniscono una accuratezza della misura rilevata molto più bassa dell'accuratezza fornita dai sistemi laser a triangolazione: i valori tipo sono in genere nell'ordine del centimetro. Sono quindi adatti all'acquisizione di grosse strutture, quali ad esempio palazzi o impianti industriali. Non tratteremo qui in dettaglio tali sistemi, e rimandiamo il lettore interessato ad alcuni siti web di

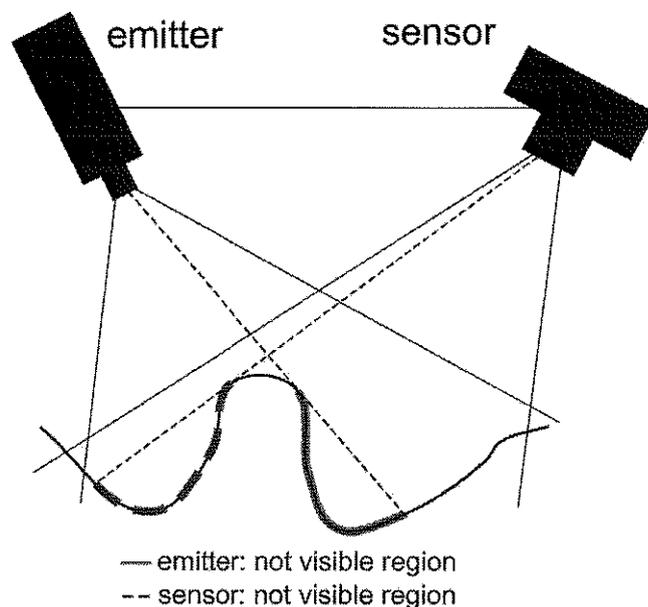


Figure 1.6: Sistemi a triangolazione: esistono zone della superficie che possono essere non visibili (e quindi non rilevate) sia dall'emettitore che dal sensore.

costruttori<sup>1</sup>.

I **sistemi ottici passivi** comprendono invece tutte le tecnologie che derivano la conoscenza dell'informazione geometrica dalla semplice osservazione di come l'oggetto appare. Tra queste possiamo citare: le tecniche basate sull'analisi di *immagini stereo* (ad es. la fotogrammetria); la ricostruzione dell'informazione spaziale da stream video (multiple calibrated images); dalla analisi delle caratteristiche di focus/defocus dell'immagine; dallo shading (o ombreggiatura), visto che quest'ultimo è in genere direttamente dipendente dall'orientamento della superficie rispetto alla sorgente di illuminazione. Una delle metodologie più diffuse in questo contesto è detta *ricostruzione da contorni (o silhouette)*, in cui appunto si fotografa l'oggetto da più viste, si estrae dalle varie immagini il contorno 2D dell'oggetto e si cerca di ricostruire un modello 3D per mezzo dell'integrazione dei vari contorni. Di questa particolare tecnologia tratteremo in maggiore dettaglio in Sezione 2.3.

### 1.3 Il pipeline di acquisizione

Alcuni sistemi di acquisizione producono direttamente un insieme regolare di campioni, in genere rappresentati da una matrice 2D di punti 3D. In altri casi, il sistema può generare un insieme di punti nello spazio 3D, senza fornire una

<sup>1</sup>Per i sistemi a tempo di volo vedere:  
il sistema Cirax 2500 di Cyra Technologies Inc. (USA), <http://www.cyra.com/>  
i sistemi della RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (Austria), <http://www.riegl.co.at/>  
il sistema DeltaSphere della 3rdTech Inc. (USA), <http://www.3rdtech.com/>

regola implicita di ricostruzione della topologia (adiacenza tra coppie di punti). In ogni caso, è necessario convertire (**range map meshing**) i dati in uscita in una rappresentazione triangolata (mesh di triangoli), in quanto quest'ultimo è il formato standard di molte applicazioni e di pressoché tutti i sottosistemi hardware per la grafica 3D. La conversione di una mappa di profondità regolare in mesh di triangoli è un'operazione immediata. Leggermente più complessa è invece la ricostruzione da punti sparsi (alcuni riferimenti si trovano in [24]). In ambedue i casi la qualità dei dati prodotti potrà essere aumentata producendo una triangolazione "ottimizzata" che, ad esempio, minimizzi localmente la curvatura Gaussiana [1].

Il processo di acquisizione automatica di un oggetto complesso non si esaurisce tuttavia con la semplice produzione di una range map. Come per fotografare un oggetto complesso sarà necessario scattare una serie di foto, così anche nel caso della scansione 3D è richiesta l'acquisizione di un insieme di range map. Tale insieme di range map dovrà essere definito in modo da coprire in modo completo tutta la superficie dell'oggetto (con una certa sovrapposizione tra le varie range map) e presentare un livello di sovrapposizione non eccessivo. Una volta acquisito questo insieme di range map, l'utente dovrà allinearle tra loro ed effettuare la fusione in un unico modello digitale continuo e privo di lacune (ossia privo di zone della superficie non riprese).

Sarà quindi necessario effettuare un post-processing dei dati, costituito da una serie di operazioni in cascata normalmente detto pipeline di acquisizione [2]. Una ideale suite di strumenti software dovrebbe assistere l'utente in tutte le fasi del processo di conversione dei dati raccolti dal sensore in uno o più modelli digitali completi, fedeli all'originale e facilmente fruibili negli ambiti applicativi di interesse. Dovrebbe quindi supportare tutte le fasi del *pipeline di acquisizione* (vedi Figura 1.7):

1. la pianificazione della campagna di acquisizione (quante range map acquisire, da che punto di vista, con che risoluzione di campionamento), in modo da ottimizzare sia il tempo di acquisizione (cioè minimizzare il numero di range map) che la copertura della superficie dell'oggetto (l'obiettivo è coprire tutta la superficie con un grado ottimale di sovrapposizione tra coppie di range map adiacenti);
2. l'acquisizione della geometria: le informazioni di profondità (range map) ottenute dal sensore per ogni "vista" dell'oggetto sono trasformate in forma di mesh triangolari, ove possibile acquisendo e producendo in uscita anche l'associata informazione di colore;
3. la registrazione (o allineamento) delle range map: le singole range map sono restituite dal device di acquisizione in uno spazio dipendente dal posizionamento relativo del device e dell'oggetto, e risultano quindi disposte nello spazio in modo apparentemente casuale (vedi un esempio in Figura 1.8). La prima fase operativa del processo di post-elaborazione quindi di portare tutte le range map in un unico spazio, allineandole tra loro [28]. Operativamente, la fase di allineamento quella più costosa in termini di tempo di lavoro richiesto all'utente;
4. la fusione delle range map: dopo averle allineate in un unico comune spazio cartesiano, le range map devono essere fuse tra loro, con l'obiettivo

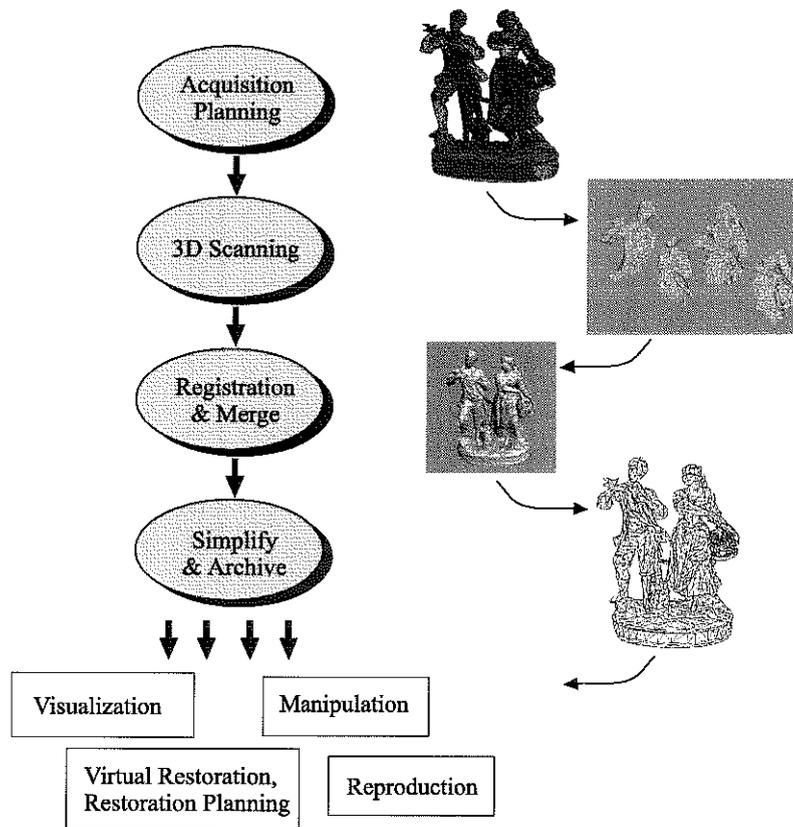


Figure 1.7: Le fasi del processo di acquisizione.

di ottenere un'unica mesh triangolare priva di ridondanza e, possibilmente, priva di lacune [13, 31];

5. l'editing del modello digitale: il processo di acquisizione non è esente da piccole anomalie topologiche o imperfezioni che possono essere rimosse in qualche caso in modo automatico o, molto più frequentemente, in modo semi-automatico;
6. la semplificazione della geometria: gli strumenti di acquisizione restituiscono informazioni spesso sovra-campionate (ad es., un eccessivo numero di campioni rilevati in zone planari dell'oggetto) e comunque in quantità tale da rendere i modelli digitali non direttamente utilizzabili per applicazioni interattive. La semplificazione può ridurre sensibilmente la complessità mantenendo sotto controllo il degrado dell'accuratezza introdotto [18, 17, 11];
7. la conservazione del dettaglio: i dettagli geometrici e pittorici che rischiano di andare persi nel processo di semplificazione possono essere codificati in termini di texture-map e bump-map [12].

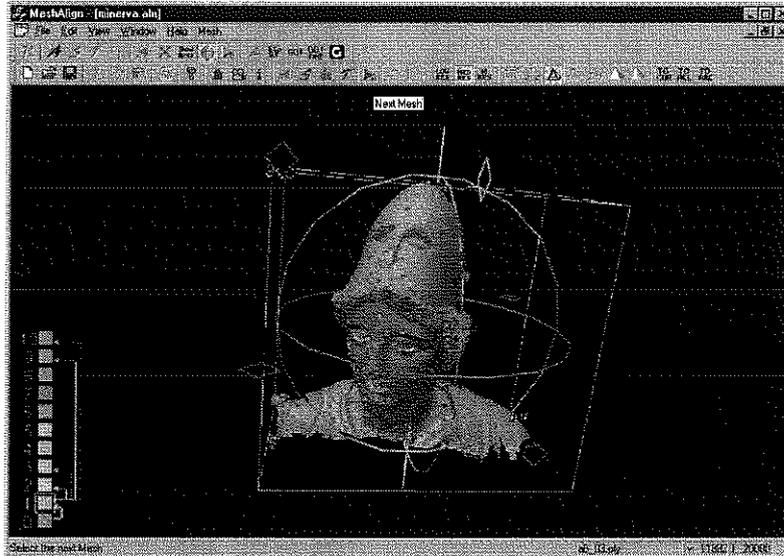


Figure 1.8: L'interfaccia di un sistema di allineamento di range map (*MeshAlign*).

Per la gestione del processo di acquisizione si può far riferimento ad alcuni sistemi software. Ogni device di scansione è corredato almeno di un software di base, che permette di gestire la produzione della singola range map e il suo trasferimento sul computer host in più formati. Solo poche case costruttrici forniscono dei tool più completi (ad esempio Cyberware), mentre la direzione che sembra prendere il mercato è quella della compartimentazione tra produttori di hardware e [pochi] produttori di software. In effetti, a tutt'oggi si possono elencare solo tre pacchetti software sufficientemente completi, prodotti da Cyberware (<http://www.cyberware.com/>), InnovMetric (PolyWorks, <http://www.innovmetric.com/>) e Inus Technologies (RapidForm2000, <http://www.rapidform.com/>). Va comunque notato che nessuno di tali pacchetti racchiude in sé tutte le funzionalità elencate precedentemente. In particolare, sono in genere carenti le funzionalità di semplificazione, molto primitive quelle di gestione del colore, e del tutto inesistenti quelle di supporto alla pianificazione della scansione.

## 1.4 L'acquisizione del colore

Un punto estremamente importante da valutare è se il device o la metodologia prescelta permettano di acquisire anche dati relativi alla "appearance" della superficie, quali ad esempio il colore o le caratteristiche di riflettanza (denominata Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF [16]). Ciò è particolarmente importante nel settore a cui ci si rivolge in modo primario con questo report (acquisizione di opere d'arte, settore Beni Culturali).

In effetti il termine "appearance" può essere usato per definire concetti diversi:

- la BRDF dell'oggetto, definita punto per punto della superficie, può essere

modellata a diversi livelli di approssimazione:

- il semplice colore della radiazione riflessa dalla superficie, che dipende pesantemente dall'illuminazione radente nel momento di acquisizione dell'immagine; è infatti pressoché impossibile poter disporre di una illuminazione controllata e uniformemente diffusa, che permetterebbe di ottenere un buon campionamento del colore della superficie, specialmente ove non si lavori in laboratorio;
- una approssimazione dell'albedo, ossia del colore della superficie indipendente dall'illuminazione corrente, calcolato assumendo che la superficie stessa abbia un comportamento lambertiano [32];
- una ricostruzione spatially-uniform o spatially-varying della BRDF della superficie, cosa però non facile in quanto: la BRDF è una funzione definita in spazio 4D, il cui campionamento richiede quindi l'acquisizione di un numero molto alto di campioni (richiederebbe di variare per ogni punto della superficie sia l'illuminazione corrente che il punto di vista); le possibili inter-riflessioni richiedono il calcolo di complesse *inverse rendering computations*;
- un campionamento dei dettagli a piccola scala dell'andamento della geometria, che in alcuni casi permette di derivare informazione sulla curvatura della geometria a risoluzione più alta di quanto ricostruibile con alcuni sistemi di scansione (soprattutto nel caso si usi uno scanner a basso costo); tali dati vengono in genere prodotti in forma di normals maps o bump maps collegate (mappate) sulla geometria; un esempio di come poter disporre di una bump map possa migliorare la sintesi di immagini di una mesh che non sia sufficientemente dettagliata è mostrato in Figura 1.9.
- infine, una completa descrizione della riflettività della superficie per mezzo dell'acquisizione di un *lightfield* [22, 21].

Dati sul colore possono essere acquisiti per mezzo di:

- un laser policromatico (vedi ad esempio alcuni sistemi progettati e realizzati dal NRC Canadese, <http://www.vit.iit.nrc.ca/>), che produce luce su diversa banda; dalla intensità della riflessione di ogni componente si possono calcolare i coefficienti di riflessione RGB della superficie (punto per punto);
- un sensore che permetta di acquisire anche immagini dell'oggetto sottoposto ad illuminazione a luce bianca (still o video camera); in quest'ultimo caso, caratteristiche importanti sono l'uso della stessa risoluzione e la registrazione dell'immagine RGB ottenuta con la range map che rappresenta la geometria; in tale caso, l'output è costituito da punti in spazio a sei dimensioni [XYZ RGB]. In alcuni sistemi lo stesso sensore CCD è usato sia per acquisire le immagini RGB che quelle necessarie alla ricostruzione della geometria, e quindi risoluzione e allineamento sono garantiti.
- un processo indipendente all'acquisizione della geometria; immagini RGB dell'oggetto possono essere acquisite con diverse metodologie e/o device (ad es. foto-camere, video-camere) e devono quindi essere registrate (e mappate) sulla rappresentazione digitale 3D acquisita precedentemente ed

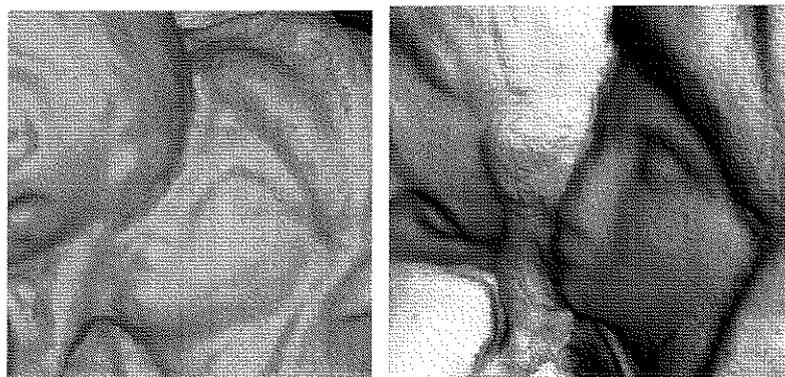


Figure 1.9: Un esempio dell'uso di informazione di dettaglio sulla forma ottenuta per mezzo di un processo di inverse illumination: sulla mesh mostrata a sinistra (solo geometria) si mappa una tessitura di bump che introduce una descrizione più fine del dettaglio relativo alla curvatura/rugosità della superficie (immagine a destra). [Immagine di F. Bernardini e H. Rushmeier]

indipendentemente con un qualsiasi device per 3D scanning. Tale operazione di registrazione può essere: *user-assisted*, per mezzo della selezione di punti corrispondenti *matching points*, ossia da coppie costituite da un punto sulla geometria ed il corrispondente punto sull'immagine [35, 9]; oppure *automatica*, ad esempio sulla base del confronto e dell'allineamento delle silhouettes [20] (ma quest'ultimo approccio purtroppo non è generale e applicabile solo a casi tutto sommato abbastanza semplici).

In molti casi si ottiene quindi una serie di range map con connessa informazione colore, o una serie di immagini RGB da mappare su una geometria nota. In entrambi i casi emerge un problema di non facile soluzione, e tra l'altro tutt'ora non supportato dai sistemi software commerciali. Il problema è come integrare immagini multiple sulla una mesh finale che rappresenta l'oggetto (a sua volta ottenuta per merge delle varie range map).

Combinare queste immagini (generalmente trattate come texture map) non è semplice, in quanto si deve tenere conto della presenza di:

- overlapping regions - le immagini in genere hanno delle zone di sovrapposizione, e quindi emerge il problema di individuare tali zone di overlap e di scegliere opportunamente nella rappresentazione del colore della zona di superficie associata la tessitura che meglio rappresenta tale zona; la qualità di una tessitura si misura in questo caso in termini di risoluzione e distorsione prospettica;
- occlusione - possono essere presenti in una tessitura pixel adiacenti che non corrispondono al colore di zone adiacenti nella superficie in quanto la presenza di occlusioni nella linea di vista più generare notevole aliasing ove semplicemente si mappi l'immagine senza tenere conto dell'effettiva topologia locale della superficie;
- potenziali errori nella registrazione delle immagini alla geometria (misregistration) - possono introdurre effetti di ghosting (dettaglio pittorico

replicato) o discontinuità;

- variazioni di tono nel colore - diverse immagini possono mostrare diverso cromatismo, ad esempio dipendente dall'illuminazione corrente;

Gli approcci presentati per l'integrazione di più immagini, acquisite e registrate sulla stessa geometria, possono essere suddivisi in due classi. La prima classe raccoglie gli approcci che operano un *resampling*, ossia una nuova tessitura viene generata per interpolazione delle immagini in ingresso [2, 3, 23, 25, 27]. Si potrà operare il resampling di: (a) un singolo colore per ogni vertice della mesh; (b) una singola porzione di tessitura per ogni faccia triangolare; (c) una porzione di tessitura per ogni patch di facce adiacenti, con tali patch definite in modo da ottimizzare la rappresentazione della mesh (principio di località e curvatura).

Il secondo approccio si basa invece sulla selezione delle zone delle immagini di ingresso che meglio rappresentano le caratteristiche della superficie campionata, sull'estrazione di tali zone dalle immagini e sul loro mapping sulla mesh. L'obiettivo qui è di scegliere con euristiche le sotto regioni più rappresentative (bilanciando la qualità della rappresentazione con il vincolo ulteriore di non voler frammentare troppo la superficie stessa, mantenendo le patch di mesh mappate sulla stessa immagine sufficientemente grandi). La giustapposizione di tessiture che diventano adiacenti una volta mappate sulla mesh può essere risolta ricorrendo ad un approccio di cross-fading [15] od operando un resampling limitato alle facce situate sul bordo di adiacenza di diverse tessiture [10, 20].

## Chapter 2

# Tecnologie 3D scanning

### 2.1 Sistemi laser

I sistemi laser hanno avuto una buona diffusione e sperimentazione grazie ad alcune loro caratteristiche: permettono di progettare sistemi compatti; assorbono poca potenza; l'uso di una sola lunghezza d'onda permette di isolare abbastanza facilmente la riflessione del fascio laser nelle immagini acquisite dal sensore; non forniscono aberrazione cromatica; permettono di mantenere una focalizzazione del fascio luminoso anche a lunga distanza (e sono quindi anche molto adatti alla realizzazione di scanner per l'acquisizione di grandi geometrie, come ad esempio i laser a tempo di volo usati per l'acquisizione di edifici o strutture architettoniche, che per brevità non verranno descritti in questo contesto).

Nonostante i primi laser scanner siano stati presentati sul mercato più di dieci anni fa, la loro evoluzione in termini di prestazioni è stata abbastanza limitata e soprattutto la riduzione dei costi è stata del tutto insufficiente (almeno se paragonata al tasso di evoluzione dell'informatica consumer).

Sono possibili diverse modalità di progettazione di un sistema laser. In particolare, l'organizzazione della coppia emettitore-sensore ed il modo in cui questi si muovono nello spazio per effettuare la scansione sono estremamente importanti sia per il costo dell'architettura (che può dipendere dal grado di complessità della meccanica e dell'ottica usata) e della precisione supportata dal sistema.

Una possibile soluzione è quella in cui la scena è campionata per mezzo dello sweep dell'emettitore (un possibile esempio è costituito dal sistema Minolta Vivid 700). La configurazione in questione è mostrata in Figura 2.1. Il pennello di luce laser viene trasformato in una lama verticale od orizzontale da un sistema di lenti fisse. La lama laser è proiettata sull'oggetto da acquisire mediante uno specchio galvanometrico controllato dal sistema. Lo spostamento progressivo dello specchio induce uno spostamento progressivo della lama che in questo modo "spazzola" completamente la superficie in esame. Ad ogni spostamento della lama avviene una acquisizione da parte del sensore ed una ricostruzione della profondità dei punti illuminati dalla lama stessa.

Svantaggi di questo tipo di soluzione sono riconducibili essenzialmente a due potenziali problemi: da una parte la perdita di risoluzione dovuta al defocus

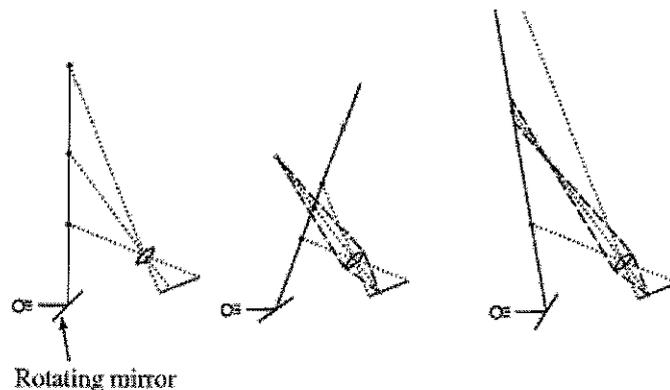


Figure 2.1: Architettura di un laser scanner: in questo caso, la rotazione di uno specchio genera lo spazzolamento (sweep) del piano di luce laser mentre il sensore è in posizione fissa.

della lama causato dallo spostamento; dall'altra è possibile assistere, durante la stessa sessione di acquisizione, ad una sensibile variazione del campo di vista (in dipendenza dalla forma e dalla topologia dell'oggetto) con conseguente sensibile e indesiderata variazione in risoluzione (vedi Figura 2.1).

Una diversa configurazione del dispositivo laser può essere la seguente. L'emettitore laser ed il sensore (camera) possono essere realizzati come sistema rigido, che costituisce la cosiddetta *scanning unit* (vedi Figura 2.2). A sua volta la scanning unit può essere spostata nello spazio in vari modi:

- manualmente (come ad esempio nel caso dei sistemi 3D Scanners o Polhemus). Questa soluzione è abbastanza economica dal punto di vista costruttivo, ma molto poco accurata e difficile da usare. La qualità dei dati infatti dipende sia dalla qualità della sottosistema che permette di rilevare la posizione della scanning unit in ogni istante di tempo (braccio con sensoristica nel caso dei sistemi 3D Scanners, rilevamento magnetico nel caso dei sistemi Polhemus), che anche da quanto l'utente è in grado di muovere il sistema in modo continuo (con la stessa velocità di traslazione) e preciso;
- da un opportuno sistema servo-assistito di traslazione (una slitta micrometrica che fa compiere alla scanning unit o all'oggetto un movimento di traslazione lineare) o di rotazione (in quest'ultimo caso è in genere l'oggetto che viene fatto ruotare di fronte alla scanning unit); un sistema per traslazione è mostrato in Figura 3.1.

Questa configurazione è in effetti quella adottata, tra gli altri, dai sistemi Cyberware di classe inferiore (vedi successiva Sezione 3.1.1).

Una terza architettura per i sistemi di acquisizione a luce laser è stata proposta nei sistemi progettati dal Canadian National Research Council (NRC). Questa tecnologia è stata depositata dal NRC of Canada, ed usata nei sistemi

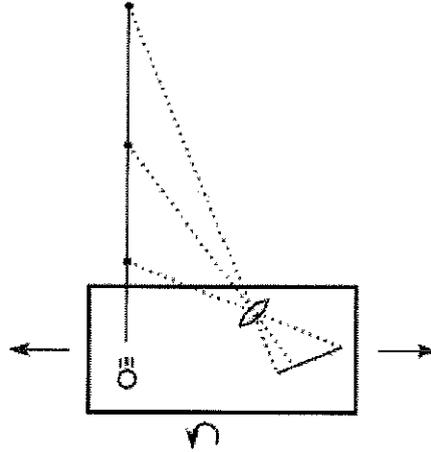


Figure 2.2: Architettura di un laser scanner: in questo caso, emettitore laser e sensore sono in posizione fissa, e lo sweep dello spazio di acquisizione viene prodotto muovendo nello spazio la scanning unit.

Arius3D (vedi Sezione 3.1.3). In questo ultimo caso lo sweep viene ottenuto tramite la contemporanea movimentazione “virtuale” sia dell’emettitore che del sensore. In effetti entrambe le unità sono fisse, ciò che si muove è un singolo specchio (riflettente sui due lati) che con il suo moto rotatorio fa divergere in modo paritario sia la linea di emissione dell’emettitore laser che la linea di vista del sensore (vedi Figura 2.3). La configurazione “virtuale” ottenuta è mostrata nel disegno a destra di Figura 2.3, che mostra la configurazione corrispondente nel caso si volesse fisicamente far muovere in modo sincronizzato le due unità.

Questa terza configurazione richiede una meccanica leggermente più complessa di quella delle soluzioni precedenti, ma permette allo stesso tempo di ottenere accuratezza e qualità dei dati maggiore. In particolare, oltre ad una maggiore precisione, abbiamo anche un campionamento a risoluzione uniforme della superficie trattata (impossibile con le precedenti due architetture). Il costo di questo tipo di sistemi rimane purtroppo molto alto.

Sufficientemente ampio risulta quindi lo spettro di tecnologie 3D scanning basate sull’emissione di luce laser e generalmente molto buoni sono i parametri di qualità ed accuratezza dell’acquisizione. Le problematiche legate alla tecnologia laser possono essere ricondotte essenzialmente a:

- a. **Speckle.** La luce laser presenta la strana proprietà di non essere uniforme: anche se proiettata su superficie perfettamente liscia, essa appare “granulosa”, come costituita di piccolissime macchioline (speckle). Questa caratteristica impone di fatto limitazioni sulla dimensione minima del raggio luminoso o sullo spessore della lama di luce;
- b. **Superfici riflettenti.** In caso di superficie perfettamente riflettenti il sensore può “non vedere” l’immagine proiettata della sorgente luminosa e

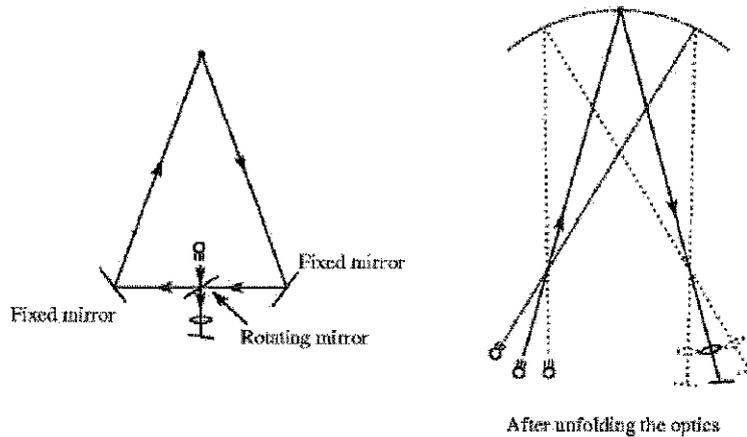


Figure 2.3: Architettura di un laser scanner: in quest'ultimo caso, le direzioni di emissione/acquisizione dell'emettitore laser e del sensore variano in modo sincrono grazie alla rotazione dello specchio (rotating mirror).

quindi può risultare impossibile stimare la profondità dell'oggetto;

- c. Acquisizione colore.** Alcuni dispositivi laser non sono predisposti per l'acquisizione delle informazioni colore oppure non permettono una acquisizione in condizioni controllate di illuminazione. In applicazioni nel settore dei BBCC questa limitazione costituisce certamente un problema in quanto impone una acquisizione separata del colore con costose operazioni di allineamento.

E' comunque corretto sottolineare che le limitazioni ai punti a. e b. precedenti risultano essere ancora più gravi nel caso di dispositivi a luce strutturata. In questi casi infatti sia la dimensione della sorgente luminosa che la presenza di materiali riflettenti costituiscono un serio problema.

## 2.2 Sistemi a luce strutturata

Come abbiamo brevemente introdotto nella Sezione 1.2, i sistemi a luce strutturata sono caratterizzati dall'uso di pattern a luce multispettro, comunemente prodotti da semplici proiettori fissi (diaproiettori o specifici flash) o da video-proiettori digitali.

Una delle prime metodologie proposte [34], tutt'ora usata in molti sistemi commerciali, utilizza un semplice pattern fisso costituito da una serie di  $n$  strisce luminose (vedi un esempio in Figura 2.4). Tale pattern permette di operare in un singolo ciclo l'emissione e la ricostruzione di  $n$  profili. La posizione spaziale dei campioni associati ad ogni profilo è ricostruita per triangolazione, analogamente a quanto visto nel caso dei sistemi laser (Figure 1.4 e 1.5).

Il problema che si presenta nel caso di oggetti a geometria molto complessa (con salti di profondità o parti in aggetto) è che alcune strisce possono presentare una sezione molto ridotta nell'immagine acquisita, o addirittura scomparire del

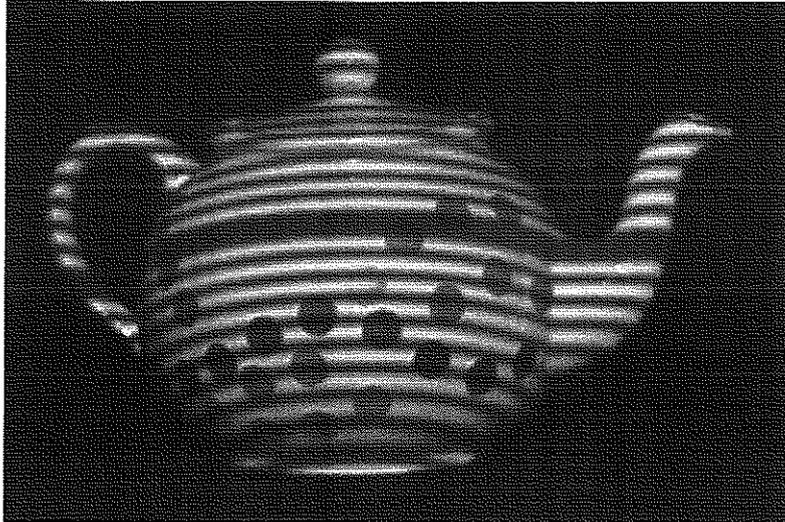


Figure 2.4: Un esempio di semplice pattern a luce strutturata (per gentile concessione di 3D Scanning Systems - Triform).

tutto (vedi Figura 2.5). Ciò dipende dal diverso angolo con cui l'emettitore ed il sensore vedono ogni particolare punto della superficie. Infatti, il metodo di triangolazione usato sia nei sistemi laser che a luce strutturata impone che tra i due componenti esista un certo angolo (approssimativamente 20-30 gradi). Alcune strisce possono non essere visibili dal punto di vista del sensore, generando quindi una scorretta ricostruzione (detta "wrong stripe re-indexing"). Con il termine di *stripe indexing* si intende la ricostruzione della corrispondenza tra i profili individuati nell'immagine acquisita e le corrispondenti strisce contenute nell'immagine strutturata proiettata sulla superficie dell'oggetto.

Questo problema può essere affrontato usando un singolo pattern ove le strisce sono colorate in modo diverso [5, 7], in modo quindi da poter riconoscere le strisce dal loro colore e non solo dalla loro sequenza spaziale. Tale approccio introduce però qualche problema nel caso di oggetti a colore non uniforme (in quanto il colore della radiazione riflessa è dipendente sia dal colore della radiazione incidente che dalla riflettività della superficie).

Una alternativa può essere di fare uso di sistemi multipattern, proiettati in modo sequenziale sull'oggetto. Usare un videoproiettore digitale offre un immediato vantaggio: si è liberi di usare (o sperimentare) un numero molto ampio di diversi pattern, od anche di usare pattern strutturati differenziati per le diverse tipologie di oggetti o materiali. Questo tipo di soluzione fornisce risultati più accurati, ma d'altro canto introduce uno svantaggio intrinseco: l'allungamento del tempo di ripresa (proporzionale al numero di pattern da proiettare ed acquisire), che la rende adatta solo all'acquisizione di oggetti statici [26, 34]. Questo approccio è in genere denominato modulazione *spazio-temporale* dell'illuminazione, ed un esempio di una possibile implementazione è in Figura 2.6. Nell'esempio in figura si usa un pattern ottenuto per suddivisione binaria di un pattern B/W iniziale [26, 36, 34, 6]; la suddivisione può essere ripetuta fino a che si giunge alla risoluzione nativa del proiettore (generando quindi 10 immagini nel caso di

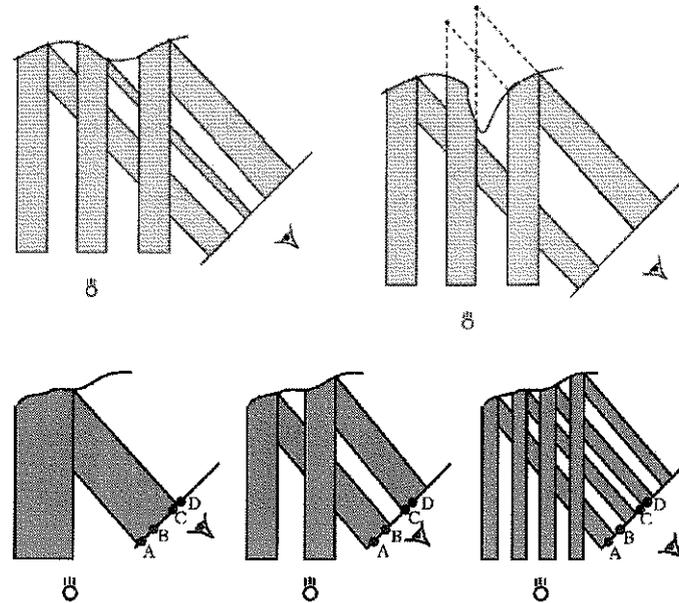


Figure 2.5: Sistemi a luce strutturata: la geometria dell'oggetto può indurre riduzioni del size delle frange riflesse, o addirittura la perdita di alcune di queste. A tale scopo sono state introdotte delle tecniche basate su più pattern (vedi figura in basso) che permettono di ricostruire in modo corretto l'ordine delle frange.

un proiettore a risoluzione 1024\*786).

In ricostruzione, un Gray code è associato ad ogni frangia riconosciuta sull'immagine acquisita; i gray code sono ricostruiti in modo progressivo: al primo step, si analizza la prima immagine (due sole bande, una bianca ed una nera) e si assegnano ai pixel nell'immagine codifica binaria opportuna. Al passo seguente, ad ogni pixel viene associato un gray code che estende la codifica precedente assegnando il valore al nuovo bit. Alla fine del processo, ogni pixel ha associato un codice a  $n$  cifre, con  $n$  il numero di immagini proiettate.

Ovviamente, affinché il processo sia corretto, si deve avere un perfetto allineamento delle  $n$  immagini riprese: sia l'oggetto ripreso, che il meccanismo emettitore, che infine il dispositivo di acquisizione devono mantenere in modo accurato la loro posizione per l'intera durata del processo.

In un sistema a luce strutturata il primo passo dell'acquisizione è ovviamente la calibrazione del sistema, eseguita in modo diverso per i diversi sistemi. In genere, si fa uso di un "probe" di calibrazione di cui si conoscono preventivamente (ed in modo accurato) le caratteristiche spaziali; il "probe" viene quindi posizionato nello spazio di acquisizione prescelto ed acquisito. Dall'analisi delle informazioni ottenute è possibile ricavare i parametri intrinseci ed estrinseci del sensore.

La vera e propria fase di acquisizione comprende: l'emissione del (o dei)

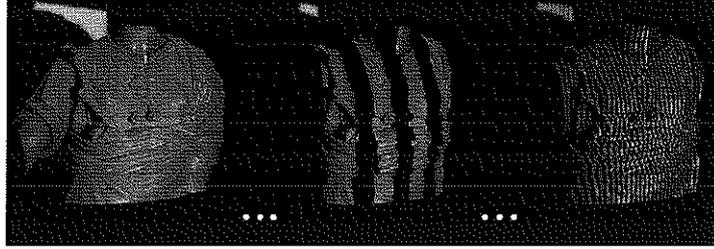


Figure 2.6: Un esempio di approccio multipattern: una serie di immagini B/W, ottenute per suddivisione binaria, è proiettata sull'oggetto in indagine.

pattern, la corrispondente acquisizione di una immagine per ogni singolo pattern ed infine l'elaborazione della/delle immagine/i riflesse per derivare la geometria dell'oggetto (range map). In particolare, assumendo di adottare un approccio basato sull'emissione di  $k$  pattern *stripe-based*, vengono in genere eseguite le seguenti elaborazioni:

- individuazione e marcatura dei pixel relativi a zone in ombra (pixel under shadow), ossia i pixel che non vanno presi in considerazione nelle successive fasi;
- individuazione e indexing delle frange riflesse dalla superficie dell'oggetto corrispondenti alle strisce prodotte dall'emettitore (per-pixel detection) e calcolo del *medial axis* di ogni frangia (usando accuratezza sub-pixel per aumentare la qualità complessiva dei prodotti della triangolazione [19]);
- per ciascun pixel  $p$  (sub-pixel accuracy) facente parte del medial axis della striscia  $j$ , si calcola il corrispondente punto nello spazio 3D per triangolazione ottica (ossia, come intersezione tra la linea di vista del sensore corrispondente al punto  $p$  ed il piano di luce corrispondente alla striscia  $j$ );
- la risultante nuvola di punti 3D viene quindi restituita in forma di range map (per ricostruzione di una mesh di triangoli aventi vertici nei punti dati od in modo implicito tramite la produzione di un array 2D di punti, con topologia implicita).

Nelle immagini acquisite possono essere presenti dei pixel corrispondenti a zone in ombra (**Pixels under shadow**, vedi Figure 1.6 e 2.7). La presenza di tali punti dipende dal diverso angolo di incidenza dell'emettitore e del sensore rispetto alla superficie da acquisire. Zone visibili dal sensore ma allo stesso tempo non raggiungibili dall'emettitore sono frequenti nel caso di superfici che presentino zone di *self-occlusion* o di forte curvatura. I pixel corrispondenti non sono individuati nè marcati al fine di non influire nelle successive operazioni.

In generale si può affermare che i sistemi ottici a luce strutturata presentano, rispetto ai sistemi laser, un certo degrado nell'accuratezza e nella qualità della ricostruzione (quanto più o meno marcato dipendendalle caratteristiche progettuali e costruttive), ma anche un sensibile miglioramento in termini di costi. Esistono in commercio sistemi a basso costo (e ovviamente bassa accuratezza),



Figure 2.7: Individuazione e marcatura dei pixel under shadow (codificati in rosso nell'immagine a destra).

e sistemi di costo ed accuratezza analoga a quello degli scanner laser di fascia bassa.

### 2.3 Sistemi a silhouette

I sistemi a silhouette appartengono alla classe dei sistemi ottici passivi e presentano un vantaggio estremamente concorrenziale: permettono di ottenere un modello completo dell'oggetto con un'unica azione. Infatti, nel caso dei sistemi a silhouette il risultato non è la produzione di una range map (con il problema di dover successivamente allineare ed unificare grossi insiemi di range map), ma direttamente un modello completo, in molti casi corredato anche di una tessitura che riporta l'informazione di colore.

Purtroppo, a tale caratteristica positiva si accoppia lo svantaggio di produrre un campionamento molto meno accurato di quello producibile con le tecniche viste precedentemente e di richiedere la "manipolazione" dell'oggetto (visto che in genere si richiede di porre l'oggetto stesso su una piattaforma rotante) Una conseguenza di quest'ultima caratteristica è la limitatezza del volume di ripresa: per definizione, il volume di ripresa massimo è in genere fisso (e non più grande di 100x100x100 cm).

La generalità del metodo è quindi limitata, ma allo stesso tempo questo approccio risulta estremamente efficiente (basso tempo di acquisizione e scarso intervento dell'operatore) e del tutto soddisfacente in termini di accuratezza per molte applicazioni (ad es. visualizzazione su web, commercio elettronico, editoria multimediale).

Il processo di **ricostruzione da silhouette** (si veda anche Figura 2.8) consta generalmente dei seguenti passi:

- acquisizione di una serie di immagini dell'oggetto, da posizioni note (in genere, ottenute facendo ruotare l'oggetto su una piattaforma); è preferibile usare un background che permetta la facile estrazione del contorno dell'oggetto;

- estrazione da ogni singola immagine della silhouette (o profilo) dell'oggetto; ogni coppia costituita dalla silhouette e dal centro di fuoco dell'apparecchio di ripresa (camera center) definisce un conoide nello spazio tridimensionale che per definizione racchiude l'oggetto (ossia, definisce un sovrainsieme dello spazio occupato);
- l'intersezione di tutti i conoidi quindi produce una approssimazione del volume dell'oggetto. La ricostruzione della superficie dell'oggetto può essere quindi operata calcolando l'intersezione dei conoidi. per quest'ultimo passo esistono in letteratura sia approcci di tipo geometrico (intersezione geometrica tra conoidi, esemplificata nel disegno centrale di Figura 2.8) che di tipo volumetrico (calcolo di una rappresentazione volumetrica binaria, ed estrazione dell'isosuperficie che separa voxel interni ed esterni, vedi disegno in basso in Figura 2.8).

L'accuratezza di tale approssimazione dipende da molteplici fattori: il numero di immagini prese in considerazione e la loro risoluzione, l'accuratezza della stima della posizione di ripresa della singola immagine, l'accuratezza con cui sono state estratte le singole silhouette, ed infine le caratteristiche di forma dell'oggetto acquisito. Si deve infatti notare che il bounding volume ricostruito corrisponde per definizione al *visual hull* del reale oggetto 3D: zone di *concavità* della superficie non possono essere ricostruite in modo accurato, in quanto i punti della superficie corrispondenti non possono mai essere parte di alcun profilo di contorno (o silhouette).

Alcune metodiche sono state proposte in letteratura per la ricostruzione delle zone concave (analisi dell'ombreggiatura, ricostruzione per selezione di punti corrispondenti da immagini stereo o multiple. etc.), ma allo stato attuale i sistemi commerciali non prendono in considerazione tale problema.

Rispetto alle tecnologie attive (laser e luce strutturata) i dispositivi 3D scanning che operano per ricostruzione da silhouette sono caratterizzati da un costo molto contenuto e, purtroppo, anche da una sensibile diminuzione della precisione. Va sottolineato che i dispositivi a silhouette, indipendentemente dal numero di immagini acquisite, non assicurano l'aderenza del modello digitale all'originale quanto piuttosto al suo *visual hull*. Per applicazioni non eccessivamente spinte questa limitazione è superata mediante l'impiego di texture-map. Un aspetto sicuramente positivo di questa classe di dispositivi è invece rappresentato dall'adottare un approccio ottico di tipo *passivo*, che lo rende utilizzabile anche nel caso di oggetti altamente riflettenti o di "difficile" illuminazione.

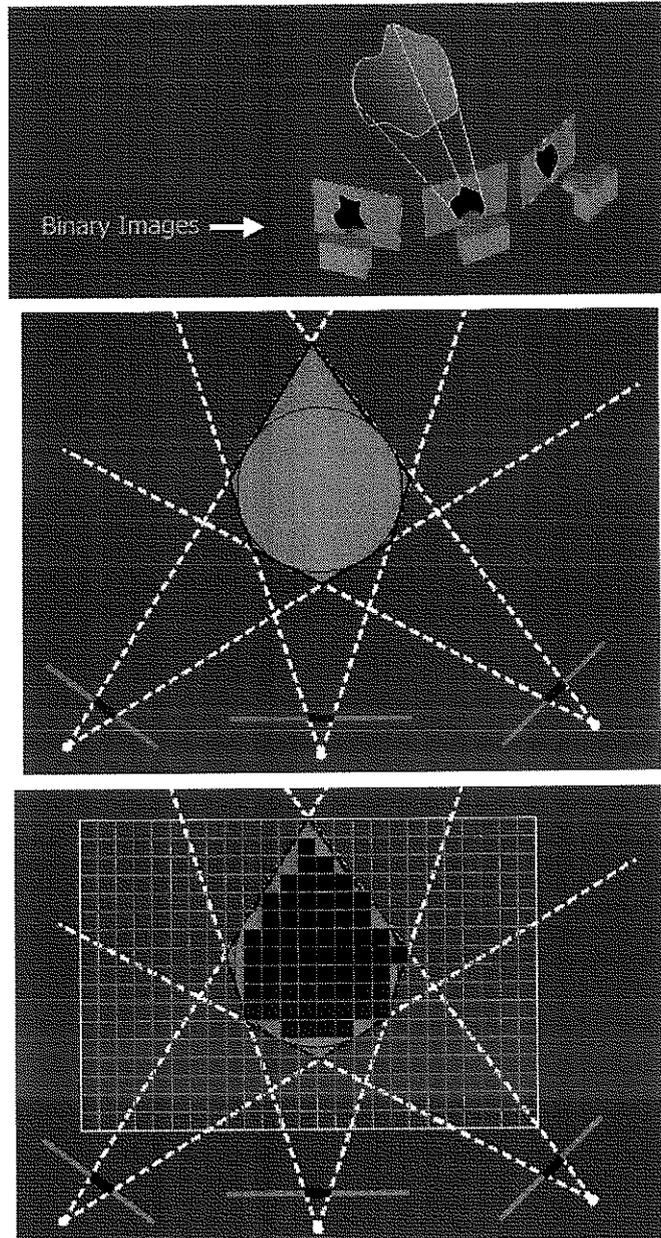


Figure 2.8: Ricostruzione da silhouette.

## Chapter 3

# Sistemi 3D scanning

In questo capitolo verranno fornite le caratteristiche principali dei dispositivi 3D scanning commerciali. La presentazione segue la suddivisione (sistemi laser, a luce strutturata ed a silhouette) già utilizzata nel capitolo precedente.

Per ogni costruttore e modello offerto abbiamo individuato, ove possibile, un certo numero di caratteristiche comuni a tutti i dispositivi in modo da rendere possibile un'analisi comparativa il più possibile oggettiva.

Le caratteristiche elencate assumono il seguente significato:

**Tecnologia** Il principio di funzionamento del dispositivo;

**Area** L'area acquisibile dallo strumento nel suo assetto minimo (ad esempio quando non provvisto dei sistemi opzionali di movimento). Nel caso di dispositivi in grado di acquisire soltanto un profilo lineare il parametro viene indicato con **Line**; in questi casi l'area effettivamente acquisibile dallo strumento si ottiene facendo riferimento, da una parte, alla lunghezza del profilo e, dall'altra, alla capacità di movimento del sistema di movimentazione su cui lo strumento è montato;

**Distanza** La distanza minima e/o massima dallo scanner cui può essere posto l'oggetto da acquisire. Spesso questa caratteristica non è esplicitata dal costruttore pur rappresentando un parametro importante in condizioni critiche di acquisizione (poco spazio libero intorno al manufatto o zone dello stesso difficilmente raggiungibili);

**Risoluzione** La distanza minima tra due campioni successivi in orizzontale ed in verticale;

**Accuratezza** Quando possibile questo parametro indica l'errore commesso nella misura. Molto spesso i costruttori indicano con accuratezza la risoluzione in profondità dello strumento;

**Velocità** Generalmente espresso in punti rilevati per secondo, il parametro fornisce una indicazione della capacità di elaborazione del dispositivo o della scheda DSP di cui è corredato;

**Colore** Nel caso di strumenti in grado di acquisire informazione colore il parametro indica risoluzione e profondità di ogni texture-map acquisita;

**Interfaccia** Tipo di interfaccia hardware di connessione tra il dispositivo ed il calcolatore ospite;

**Trasferimento** Tempo medio di trasferimento dei dati al calcolatore ospite;

**Hosts** Elaboratori e sistemi operativi cui il dispositivo può essere connesso;

**Dimensioni - Peso** Dimensioni e Peso dello strumento limitatamente alla parte di acquisizione;

**Costo** Fascia di prezzo indicativo del modello trattato in dettaglio nella scheda (buona parte di questi dati sono ricavati dalla quotazione in dollari desunta dai siti web dei costruttori/rivenditori esteri, mancando distributori sul mercato nazionale).

Ove presenti, forniamo anche informazioni di sintesi sugli eventuali dispositivi opzionali di movimento e sul software in dotazione.

## 3.1 Sistemi laser

### 3.1.1 Cyberware

<http://www.cyberware.com/> - Tabella 3.1

Cyberware produce essenzialmente tre diverse unità di scansione (Model 15, 3030RGB e WB4).

Il **Model 15** viene fornito con un sistema completo di scansione dotato di piattaforma a movimento rotatorio o lineare e di software di base. E' adatto all'acquisizione di oggetti di dimensioni abbastanza contenute (250mm x 150mm X 75mm). Al contrario l'unità di scansione **WB4** viene montata soltanto sul sistema *Whole Body Color 3D*, un sistema a 4 teste di scansione che ben si presta all'acquisizione di interi corpi umani.

L'unità di acquisizione certamente più flessibile ed adatta alla nostra applicazione di riferimento è il modello **3030RGB**. E' basata sull'emissione di una sottile lama di luce laser e sull'acquisizione del profilo di luce emesso (da due diversi punti di vista) da parte di un sensore video di alta qualità. Lo schema di funzionamento è riconducibile a quello mostrato in Figura 2.1. Le informazioni colore sono acquisite mediante un sensore video separato da quello preposto all'acquisizione del segnale laser. La Cyberware commercializza anche i modelli **3030HIREZ** (con un volume di scansione ridotto in favore di una risoluzione di scansione maggiore) e **3030HRC** (in cui le texture map contenenti le informazioni colore raggiungono la dimensione di 2000 x 2000 pixel).

#### Sistemi di movimento

Cyberware prevede un discreto numero di sistemi di movimentazione delle unità di acquisizione. In particolare il modello 3030RGB può essere montato sulle piattaforme **PS** (rotazione completa di 360 gradi servo-assistita e movimento manuale in altezza da 0 a 350mm), **MS** (con movimento rotatorio o lineare fino a 1m) e **MM** (con movimento rotatorio o lineare fino a 350mm).

#### Software

Cyberware dispone di un discreto pacchetto di programmi software a corredo dei suoi sistemi di acquisizione. Il pacchetto standard **CyDir** si presenta come una interfaccia grafica che assiste l'utente nella digitalizzazione. Esso comprende tool per assemblaggio ed editing di molteplici range map, e per il merging delle mappe di profondità in un unico modello 3D. CyDir prevede anche funzionalità per la semplificazione geometrica (non troppo recenti e efficienti rispetto agli ultimi approcci presentati in letteratura), per la conversione di formato, per il fitting sui punti acquisiti di superfici NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline).

Cyberware 3030RGB	
Tecnologia	Laser stripe con specchio galvanometrico
Area (mm)	260x300
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	0.25 - 1.0mm
Accuratezza (mm)	0.0007 (?risoluzione in Z?)
Velocità (pts x sec)	14.580
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	1024x1024 - 24
Interfaccia (type)	SCSI
Trasferimento (sec)	nd
Hosts	SGI, PC-NT
Dimensioni (cm)	51x37x48
Peso (Kg)	29
Costo (Ml)	170 [83K USD]

Table 3.1: Caratteristiche del Cyberware 3030RGB (nd - dato non disponibile).

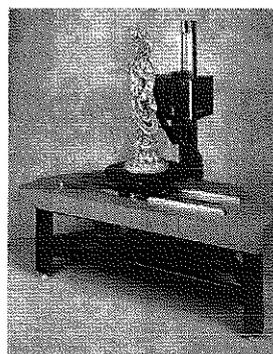
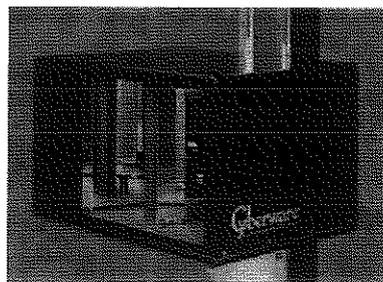


Figure 3.1: Scanning unit (Cyberware 3030) e dispositivo per traslazione lineare della Cyberware.

### 3.1.2 Minolta

<http://www.minolta3d.com/> - Tabella 3.2

Minolta ha recentemente immesso sul mercato l'ultimo modello, il **Vivid-900**, di una serie di scanner laser che, iniziata con il Vivid-700 e proseguita poi con il Vivid-300, è andata progressivamente migliorando in termini di accuratezza e rapporto qualità-prezzo.

Basato su tecnologia laser stripe, il Vivid-900 presenta le seguenti caratteristiche:

- una doppia modalità di scansione, **FAST** e **FINE** che permette all'utente di privilegiare il tempo di acquisizione rispetto alla risoluzione o viceversa;
- tre obiettivi intercambiabili, **TELE**, **MIDDLE** e **WIDE**, che consentono di modificare sensibilmente il volume di scansione dipendentemente dall'oggetto in esame (Figura 3.2);

- un array di 640x480 pixel CCD che sono utilizzati sia per la funzione di scanner che per l'acquisizione delle informazioni colore. Per queste funzioni il dispositivo impiega quattro diversi filtri a rotazione (R, G, B e misura 3D) sullo stesso sensore di acquisizione.

### Sistemi di movimento

Minolta offre una piattaforma rotante che può essere pilotata da un computer host tramite collegamento seriale.

### Software

Il software in dotazione è proprietario e permette l'editing, la registrazione e la fusione di molteplici range map (va però detto che tali funzionalità mostrano un'efficienza e usabilità inferiore a quelle fornite da sistemi di post-processing prodotti da terze parti), nonché la conversione dei dati in diversi formati standard.

<b>Minolta - Vivid-900</b>	
Tecnologia	Laser stripe con specchio galvanometrico
Area (mm)	111x84 (TELE) 710x533 (MIDDLE) 1300x1100 (WIDE)
Distanza (cm)	60 - 120
Risoluzione (mm)	0.17x0.17
Accuratezza (mm)	0.047
Velocità (pts x sec)	122,000
Durata (sec)	0.3 (FAST) - 2.5 (FINE)
Colore (res - bit)	640x480 - 24
Interfaccia (type)	Fast SCSI
Trasferimento (sec)	2
Hosts	PC-NT
Dimensioni (cm)	21x42x33
Peso (Kg)	11
Costo (Ml)	85

Table 3.2: Caratteristiche del Minolta Vivid-900 (nd - dato non disponibile).

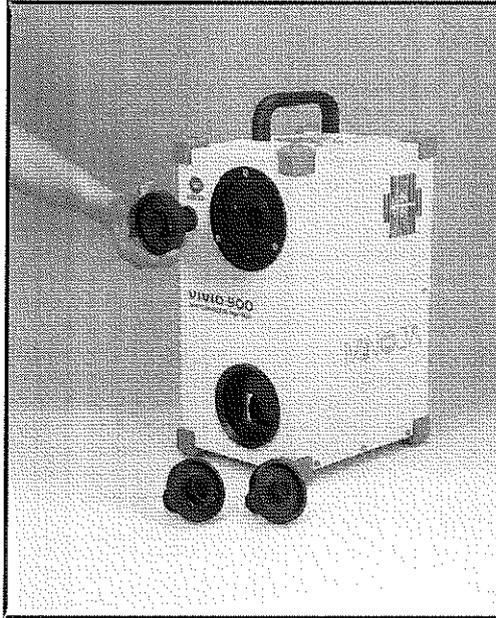


Figure 3.2: Il Minolta Vivid-900 con le tre ottiche intercambiabili.

### 3.1.3 Arius3D Inc.

<http://www.arius3d.com/> - Tabella 3.3

Arius3D è una società di recente costituzione nata dalla pluriennale esperienza nel settore dell'acquisizione 3D del Visual Information Technology del National Research Council (NRC) Canadese, che ha trasferito parte della tecnologia brevettata NRC alla ditta Arius3D.

Lo scanner **Arius3D** può essere considerato il top di gamma sia per quanto riguarda la risoluzione nell'acquisizione della forma (sampling di  $50\mu$  in X e Y ed accuratezza nell'ordine dei  $10\mu$  in Z) che per l'accuratezza nell'acquisizione del colore (acquisisce una buona approssimazione dell'albedo - o colore reale, indipendente dalle condizioni di illuminazione ambiente). Il principio di funzionamento dello scanner è quello riportato schematicamente in Figura 2.3: in esso un unico specchio a doppia faccia proietta e riceve un fascio laser collimato (unfolded optics).

L'informazione di colore è acquisita valutando l'intensità di riflessione del laser, che produce in sequenza luce sulle tre diverse lunghezze d'onda RGB. Dalla intensità di riflessione di ogni singola lunghezza d'onda sulla superficie dell'oggetto (mediata rispetto all'orientamento locale della superficie, in funzione della geometria calcolata nella prima fase di acquisizione) si determina la riflettività della superficie per ognuna delle tre componenti (ossia, il colore apparente).

Una particolarità dell'offerta della ditta Arius è di non puntare per ora alla vendita di sistemi hardware, ma di offrire solo un servizio completo ai potenziali clienti (hardware, software e supporto tecnico), da definire in termini economici

in accordo alla complessita' del lavoro da svolgere. Una proposta preliminare fornita da Arius relativa ad una ipotetica acquisizione di 1000 oggetti nell'arco temporale di un anno si configurava in un costo nell'ordine di 1.500.000 US\$.

### Sistemi di movimento

Il sistema Arius genera un piano laser (per deflessione del fascio laser operata dallo specchio rotante). Una singola range map puo' essere quindi ottenuta o per traslazione della unita' di scansione, oppure per rotazione dell'oggetto da acquisire (via piattaforma rotante).

### Software

Il pacchetto software generalmente impiegato a valle dell'acquisizione con lo scanner Arius3D è **PolyWorks**, prodotto dalla InnovMetric (<http://www.-innovmetric.com/>) una società canadese molto attiva nel settore del 3D scanning, del rapid prototyping e del CAD-CAM (e proposta anche da molti altri produttori di hardware come sistema di post-processing dei dati acquisiti).

Arius3D	
Tecnologia	Laser scanner a singolo specchio sincronizzato
Area (mm)	min 50x50, max nd
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	0.05x0.05
Accuratezza (mm)	0.01
Velocità (pts x sec)	20,000
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	1,000x1,000 - 36
Interfaccia (type)	nd
Trasferimento (sec)	nd
Hosts	SGI
Dimensioni (cm)	20x20x40 (solo testa scanner)
Peso (Kg)	nd
Costo (Ml)	solo uso in service

Table 3.3: Caratteristiche del sistema Arius3D (nd - dato non disponibile).

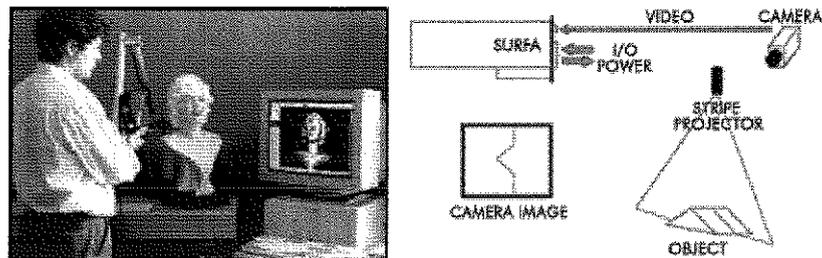


Figure 3.3: Uno dei modelli 3D Scanners ModelMaker (a sinistra) ed il principio di funzionamento della testa di acquisizione (a destra).

### 3.1.4 3D Scanners: ModelMaker

<http://www.3dscanners.com/> - Tabella 3.4

La 3D Scanners, società inglese che ha iniziato la propria attività nell'ambito di un progetto Esprit della Comunità Europea, commercializza attualmente 2 diversi tipi di scanner: ModelMaker e Reversa. Reversa è orientato essenzialmente ad applicazioni industriali, ModelMaker, al contrario, è general purpose e può essere impiegato in applicazioni orientate ai BBCC.

Il principio di funzionamento dei diversi modelli **ModelMaker** (caratterizzati da differenti risoluzioni e quindi velocità di acquisizione) è quello molto semplice illustrato nelle Figure 2.2 e 3.3 caratterizzato da un emettitore di singola stripe laser solidale con il sensore di acquisizione.

Lo scanner è completato da un braccio estensibile per il rilevamento del movimento; il braccio, generalmente un Faro Bronze (<http://www.faro.com/>), restituisce ad ogni istante la posizione dello scanner permettendo quindi l'allineamento delle diverse acquisizioni.

L'interpretazione dei dati rilevati dal sensore è effettuata da una scheda DSP per PC e relativo software, fornita direttamente da 3D Scanners. Il software è predisposto per il riconoscimento di *datum balls* (sferette di colore bianco) che rendono possibile un allineamento semi-automatico di range map distinte.

#### Sistemi di movimento

Non sono previsti dispositivi di movimento opzionali data l'ampia flessibilità di spostamento dello scanner stesso.

#### Software

Oltre all'indispensabile pacchetto software per l'allineamento dei diversi profili acquisiti muovendo manualmente lo scanner e la loro fusione in un unico modello digitale, 3D Scanners offre due ulteriori prodotti: uno strumento di decimazione (o semplificazione) geometrica della complessità dei modelli ed uno strumento (ReMesh) per la conversione da modello triangolato a rappresentazione NURBS.

ModelMaker	
Tecnologia	Laser stripe scanner
Linea (mm)	35 (mod. W35, max Z 50mm) 70 (mod. W70, max Z 90mm) 140 (mod. W140, max Z 180mm)
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	0.06
Accuratezza (mm)	nd
Velocità (pts x sec)	14,000 (25 lines x sec.)
Durata (sec)	—
Colore (res - bit)	—
Interfaccia (type)	nd
Trasferimento (sec)	nd
Hosts	PC Windows NT
Dimensioni (cm)	nd
Peso (Kg)	nd
Costo (Ml)	nd

Table 3.4: Caratteristiche dei diversi modelli ModelMaker della 3D Scanners (nd - dato non disponibile).

### 3.1.5 Polhemus: FastScan

<http://www.polhemus.com/fastscan.htm> - Tabella 3.5

Molto simile ai sistemi 3D Scanners nella concezione di base è il sistema di acquisizione **FastScan** della Polhemus, società neo-zelandese. Anche in questo caso il dispositivo di scansione è del tipo mostrato in Figura 2.2 e viene liberamente e manualmente mosso dall'operatore.

A differenza dei modelli ModelMaker, FastScan (Figura 3.4) presenta due videocamere monocromatiche miniaturizzate per l'acquisizione (a destra e sinistra dell'emettitore laser) ed un sistema di rilevamento magnetico della posizione e dell'orientamento dello scanner. Proprio per la natura magnetica del rilevatore di posizione, FastScan non si presta all'acquisizione di oggetti metallici o ad essere impiegato in ambienti con strutture metalliche o difficilmente controllabili.

Il dispositivo FastScan non prevede l'acquisizione del colore.

#### Sistemi di movimento

Non sono previsti dispositivi di movimento opzionali data l'ampia flessibilità di spostamento dello scanner stesso.

#### Software

Il software in dotazione è piuttosto limitato: vengono forniti tool di presentazione dei dati acquisiti, di allineamento/merge e di conversione tra formati grafici.

Polhemus - FastScan	
Tecnologia	Laser stripe scanner
Linea (mm)	150
Distanza (cm)	Min 20
Risoluzione (mm)	0.5
Accuratezza (mm)	1
Velocità (pts x sec)	15,000 (50 lines x sec.)
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	
Interfaccia (type)	ECP Parallel
Trasferimento (sec)	..
Hosts	PC Windows NT
Dimensioni (cm)	nd
Peso (Kg)	nd
Costo (Ml)	80

Table 3.5: Caratteristiche del sistema FastScan di Polhemus (nd - dato non disponibile).

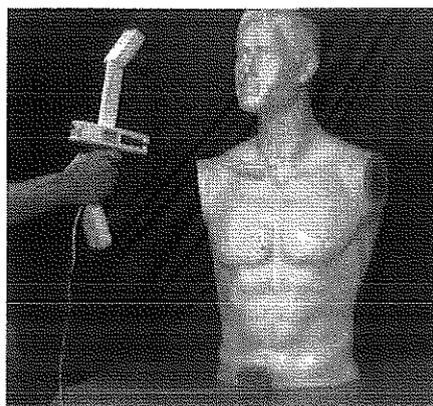


Figure 3.4: Il sistema FastScan di Polhemus.

### 3.1.6 Vitana Inc.: ShapeGrabber

<http://www.shapegrabber.com/> - Tabella 3.6

Vitana Inc. è un'altra compagnia Canadese che impiega la tecnologia messa a punto dal National Research Council Canadese. Lo scanner **Shapegrabber** è prodotto in 3 modelli diversi (Tabletop, Portable e Gantry) e può essere corredato fino a 4 diversi dispositivi di acquisizione (Extra Small, Small, Medium e Large) caratterizzati da diverse risoluzioni, campi di vista ed accuratezza. I dispositivi di acquisizione sono gli scanner a linea BIRIS del NRC Canadese.

I modelli Tabletop e Gantry non si prestano ad un uso flessibile dello strumento. Il modello Portable monta i dispositivi Medium o Large e consente alla testa di acquisizione una rotazione di 335° mediante motori passo-passo controllati da personal computer.

### Sistemi di movimento

Il movimento rotatorio dello strumento fa parte del modello Portable stesso.

### Software

Il software in dotazione é il **PolyWorks** della InnovMetric (<http://www.innovmetric.com>), lo stesso adottato da Arius 3D ed altri.

Vitana - Shapegrabber	
Tecnologia	Laser stripe scanner
Linea (mm)	(extra small) 40-63 (small) 75 to 116 (medium) 132 to 211 (large) 211 to 651
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	(extra small) 0.15 (small) 0.3 (medium) 0.5 (large) 0.8
Accuratezza (mm)	(extra small) 0.025 (small) 0.05 (medium) 0.075 (large) 0.2
Velocità (pts x sec)	150,000
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	—
Interfaccia (type)	ECP Parallel
Trasferimento (sec)	---
Hosts	PC Windows NT
Dimensioni (cm)	5 x 7.5 x 27.5 (scanning head)
Peso (Kg)	11
Costo (MI)	≈ 110Ml [50K USD]

Table 3.6: Caratteristiche del sistema ShapeGrabber Portable di Vitana Inc. (nd - dato non disponibile).

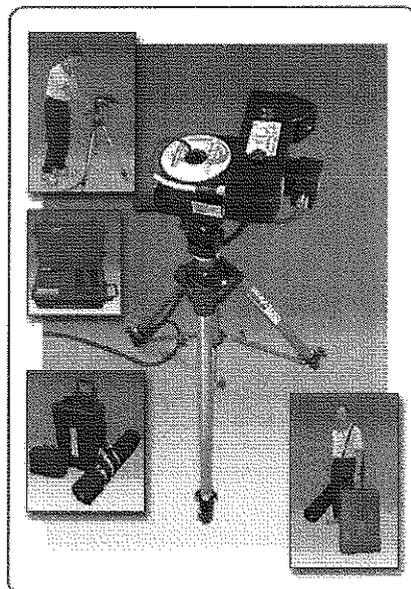


Figure 3.5: Il sistema ShapeGrabber Portable di Vitana Inc.

### 3.1.7 Laser Design Inc.: Surveyor PS-Series

<http://www.laserdesign.com/> - Tabella 3.7

La serie PS (Portable Scanning) dei sistemi di acquisizione laser di Laser Design Inc. (USA) prevede alcuni modelli tutti basati sul classico principio dell'emissione di una lama laser mossa da uno specchio galvanometrico. Ai fini della nostra ricerca il modello **PS-3300C** è il più significativo in quanto l'unico in grado di acquisire informazioni colore (il sensore CCD acquisisce anche una texture RGB allineata alla geometria) .

#### Sistemi di movimento

Non sono previsti.

#### Software

Laser Design Inc. ha sviluppato il prodotto **DataSculpt** che prevede numerose possibilità operative: dalla eliminazione del rumore o degli spike dai dati acquisiti, all'allineamento e fusione delle scansioni; dall'editing dei dati (filtraggio, scalatura, meshing, offsetting sono solo alcune delle operazioni possibili) fino alla generazione automatica dei percorsi strumento per le macchine a controllo numerico fino a 5 assi.

Laser Design - Surveyor PS-3300C	
Tecnologia	Laser stripe scanner
Area (mm)	900x900
Distanza (cm)	20-80
Risoluzione (mm)	nd
Accuratezza (mm)	0.03
Velocità (pts x sec)	15,000
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	768x494 - 24
Interfaccia (type)	USB
Trasferimento (sec)	—
Hosts	PC Win*
Dimensioni (cm)	25x25x8
Peso (Kg)	2
Costo (Ml)	nd

Table 3.7: Caratteristiche del sistema Surveyor PS-3300C di Laser Design Inc. (nd - dato non disponibile).

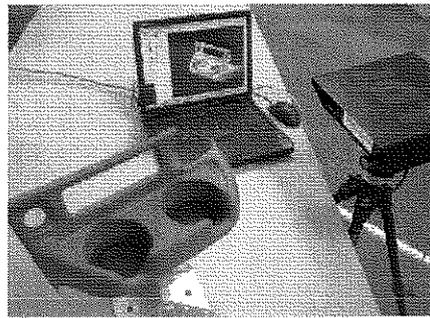


Figure 3.6: Il sistema PS-3300C di Laser Design Inc.

### 3.1.8 Altri sistemi laser

In questa sezione riportiamo, per completezza, alcuni dei dispositivi che non abbiamo ritenuto opportuno inserire nella precedente analisi di dettaglio in quanto non idonei al target di progetto.

#### Digibot II HD

<http://www.digibotics.com/>

Il sistema **Digibot II Heavy Duty** è uno scanner laser essenzialmente indirizzato ad applicazioni industriali. L'emettitore emette una luce laser puntiforme e due camere CCD, montate rispettivamente a destra ed a sinistra del laser, rilevano l'immagine. Il sistema di acquisizione può muoversi lungo i tre assi cartesiani, l'oggetto da acquisire è posto su una piattaforma rotante. Il sistema richiede movimentazione dell'oggetto da acquisire e non rileva le caratteristiche di colore o tessitura.

### **Hyscan 45c**

<http://www.hymarc.com/>

Il sistema **Hyscan 45c** della Hymarc è essenzialmente una testa laser progettata per poter essere collegata a strumenti CMM (Coordinate Measuring Machines) o altri sistemi di traslazione o movimentazione nello spazio.

L'emettitore produce uno spot laser, movimentato per sweeping dalla testa laser. Specifiche fornite dal costruttore: point sample rate 10kHz; accuratezza: 0.025 mm; risoluzione nell'asse di sweeping (nominal) 0.1 mm; depth of field 60 mm; scan width (nominal) 60 mm; stand off (nominal) 100 mm.

Il sistema non rileva le caratteristiche di colore o tessitura.

Il costo del sistema è di 78.000 USD (e non include il sistema di movimentazione).

### **Kreon: Non-Contact 3D Laser Scanning**

<http://www.kreon3d.com/>

La società francese (sede a Limoges) produce due modelli di scanner laser basato sull'emissione di stripe laser. I due modelli (**KLS51** e **KLS171**) si differenziano semplicemente per l'angolo di triangolazione, cioè per la distanza fissa esistente tra emettitore e videocamera. I sensori di acquisizione Kreon possono essere montati su un numero molto elevato di dispositivi di movimentazione quali apparecchiature CNC (sistemi a controllo numerico), CMM (sistemi per la misura di coordinate) o dispositivi a controllo manuale quali braccia articolate.

I sistemi Kreon si caratterizzano per la buona risoluzione ed accuratezza ma sono orientati essenzialmente ad applicazioni industriali e non prevedono l'acquisizione delle informazioni colore e/o tessitura.

Kreon ha anche sviluppato un pacchetto software (chiamato **Polygonia**) per il controllo della fase di acquisizione. Dalle scarse informazioni disponibili via web, sembra non offrire molto di più di un driver di gestione dello strumento e routine di conversione di formato e di visualizzazione dei risultati intermedi.

### **Mensi: SOISIC Scanner**

<http://www.mensi.com/index.html>

Scanner laser basato su un singolo fascio luminoso puntiforme. La scansione è ottenuta linearmente mediante uno specchio galvanometrico; le diverse linee sono ottenute per rotazione dello strumento. Di dispositivi **SOISIC** ne sono commercializzati due diversi modelli con differenti capacità operative: da 2.5 a 25 metri per la versione Long Distance e da 0.8 a 10 metri per la versione Short Distance.

Il costo del sistema è di circa 200ML.

### **Steinbichler: Triangulation Scanner e Autoscan**

<http://www.steinbichler.de/>

Un altro scanner laser (linea laser), con movimentazione manuale. Un sistema di tracking meccanico (braccio articolato) a 6 gradi di libertà consente di monitorare costantemente ed accuratamente la posizione dello scanner e quindi di registrare in modo automatico le diverse misure effettuate. Sufficiente velocità di acquisizione (sampling rate di 25 kHz) e buona accuratezza (+/- 30 micron).

In Collaborazione con la Carl Zeiss, nota ditta tedesca di ottica, Steinbichler produce anche **AutoScan** un nuovo sensore di scansione laser di ottime prestazioni in termini di accuratezza. E' adatto a riprese molto accurate di piccole aree, in la scan area e' di circa 10 mm per una profondita' di acquisizione massima di 26 mm.

Entrambi i sistemi sono orientati ad applicazioni di metrologia industriale, e non prevedono acquisizione del colore.

### **Third Dimension**

<http://www.third.com/>

La societa' **Third Dimension** (UK) produce sistemi di scansione 3D tra cui **Gap Gun**, uno scanner laser (line sweep) hand-held. Ricorda il sistema Polhemus, ed e' orientato principalmente alle applicazioni di metrologia industriale.

Si limita alla ricostruzione della geometria.

## 3.2 Sistemi a luce strutturata

Proseguiamo l'analisi dei sistemi 3D scanning commerciali introducendo alcuni tra i più significativi dispositivi a luce strutturata. Anche in questo caso abbiamo cercato di rendere comparabili i diversi sistemi riassumendone sinteticamente parametri comuni.

### 3.2.1 InSpeck: 3D Capturor

<http://www.inspeck.com/> - Tabella 3.8

InSpeck, società canadese, produce scanner 3D basati sull'emissione di pattern a luce alogena. I modelli di base forniti dalla casa sono: **3D Capturor** (il prodotto entry-level fornito con una ottica a scelta tra tre possibili, Small Field, Standard Field, e Large Field), **3D-DF** (il sistema intermedio, Dual Field, con due ottiche che consentono un campo di vista stretto ad alta risoluzione o largo a bassa risoluzione) e **3D Body Builder** (per l'acquisizione di corpi umani in tempi ristretti).

L'accuratezza e' in questo caso sensibilmente piu' bassa di quella supportata dai sistemi laser (circa un ordine di grandezza). Il tempo di acquisizione e' invece abbastanza rapido (0.3 sec per una singola range map 640x480).

#### Software

Tutti i sistemi di acquisizione InSpeck sono corredati di due pacchetti software: **InSpeck-FAPS** (il Fringe Acquisition and Processing Software, utilizzato per il controllo del processo di acquisizione) e **InSpeck-EM** (il modulo di Editing e Merging dei modelli 3D).

InSpeck - 3D Capturor	
Tecnologia	Ottico a luce alogena
Area (mm)	370x275 (Small Field) 580x430 (Standard Field) 1100x800 (Large Field)
Distanza (cm)	130 (120, 120)
Risoluzione (mm)	0.6x0.6 (0.9x0.9, 1.8x1.8)
Accuratezza (mm)	0.5 (0.8, 1.1)
Velocità (pts x sec)	nd
Durata (sec)	0.3
Colore (res - bit)	640x480 - 24
Interfaccia (type)	PCI Frame Grabber
Trasferimento (sec)	—
Hosts	PC Windows NT
Dimensioni (cm)	36x33x13
Peso (Kg)	nd
Costo (Ml)	30 [15K USD]

Table 3.8: Caratteristiche del sistema 3D Capturor di InSpeck (nd - dato non disponibile).

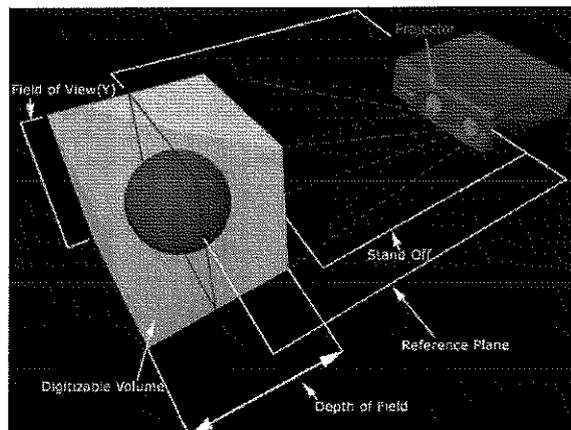


Figure 3.7: I parametri significativi del dispositivo 3D Capturor di InSpeck Inc.

### 3.2.2 Optonet: Opto 3D-Ranger

<http://www.optonet.it/> - Tabella 3.9

Optonet e' una societa' italiana di recente costituzione, che produce uno scanner a luce strutturata di sua progettazione, **Opto 3D-Ranger**. Il dispositivo si basa sull'emissione di luce strutturata (frange BW a suddivisione binaria e shift di fase), adotta un proiettore special purpose e usa come sensore una videocamera con scheda frame grabber su PC (vedi Figura 3.8). Il sistema fornisce un buon grado di accuratezza in Z ( $\pm 0.035$  mm, valutata empiricamente su piani di riscontro con planarita' certificata<sup>1</sup>).

La struttura su cui sono montati emettitore e sensore fornisce vari gradi di liberta' nella configurazione del set-up ottico-geometrico (la geometria relativa emettitore-sensore), permettendo di misurare in modo ottimale oggetti dalle diverse forme e dimensioni.

E' in corso di realizzazione e commercializzazione una nuova versione del sistema, capace di acquisire anche l'informazione di colore (**Opto 3D-Ranger/C**) grazie all'adozione di una videocamera a colori.

#### Software

Il software fornito a corredo con il dispositivo consente soltanto le operazioni basilari di gestione della singola operazione di scansione e conversione dei dati. La Optonet e' partner e distributore in Italia del pacchetto **PolyWorks** di InnovMetric (<http://www.innovmetric.com/>).

<sup>1</sup>Alcune valutazioni di accuratezza presentate da altri produttori lasciano alquanto perplessi, e sembrano indicare piu' valori teorici che il risultato di test empirici valutati sul campo. In effetti la mancanza di una procedura standard di valutazione dell'accuratezza, accettata dai vari produttori e utilizzata nella definizione delle caratteristiche di sistema, e' uno dei punti piu' critici nella valutazione delle caratteristiche di un sistema e nell'analisi comparativa. Da questo punto di vista la ditta Optonet si distingue per serietà e correttezza nella presentazione delle caratteristiche del suo scanner.

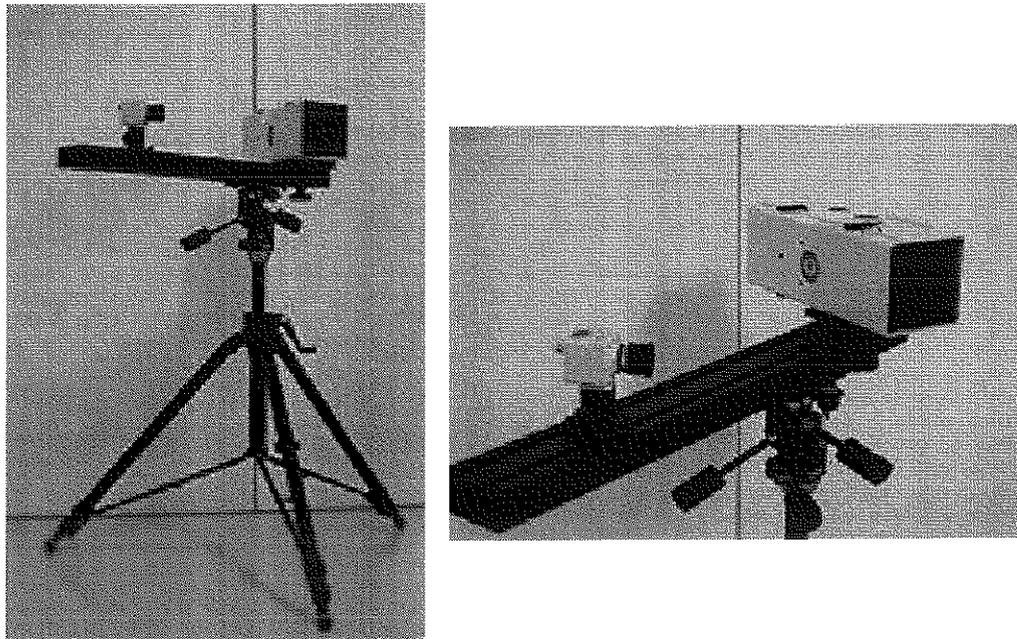


Figure 3.8: Il sistema Opto3DRanger di Optonet.

### 3.2.3 RSI: DigiScan 2000

<http://www.rsi.gmbh.de/zemain.htm> - Tabella 3.10

Il sistema **DigiScan 2000** di RSI, una delle società tedesche leader nel settore dell'acquisizione, della modellazione e della misurazione 3D, è costituito da un classico video-proiettore in tecnologia LCD oppure DLP pilotato da un personal computer, una o due video-camere con frame grabber pilotato dallo stesso personal e uno strumento di calibrazione del sistema.

Il principio di funzionamento dello scanner non è reso pubblico da RSI in quanto in corso di brevettazione. Dalle succinte descrizioni sembra tuttavia di capire che il dispositivo si basa sull'emissione di luce strutturata e shift di fase.

#### Sistemi di movimento

Il sistema è integrabile con una piattaforma rotante pilotata direttamente dal personal che controlla l'acquisizione.

#### Software

RSI fornisce il software di base per la ricostruzione di modelli 3D acquisiti con DigiScan 2000 e per la registrazione e fusione di mappe di profondità. RSI è anche distributore dei pacchetti software per misura e modellazione 3D [**SolidThinking** (modellatore solido), **Rhinoceros** (conversione di geometrie poligonali in NURBS), e **Decimator** (semplificazione geometrica)].

<b>Optonet - Opto 3D-Ranger</b>	
Tecnologia	Stripe pattern con shift di fase
Area (mm)	da 100x75 in su
Distanza (cm)	da 35 a 150
Risoluzione (mm)	0.13 (FOV 100x75 mm) 0.26 (FOV 200x150 mm) 0.39 (FOV 300x225 mm)
Accuratezza (mm)	$\pm 0.035$ (FOV 100x75 mm)
Velocità (pts x sec)	$\approx 200K$
Durata (sec)	< 2 sec
Colore (res - bit)	768x576, 24
Interfaccia (type)	via scheda framegrabber
Trasferimento (sec)	---
Hosts	PC Windows NT
Dimensioni (cm)	circa 100x50x30
Peso (Kg)	6.4
Costo (Ml)	100-120 (conf. depend.)

Table 3.9: Caratteristiche del sistema Opto 3D-Ranger di Optonet (nd - dato non disponibile).

### 3.2.4 Steinbichler: Comet

<http://www.steinbichler.de/> - Tabella 3.11

Il sistema **Comet** di Steinbichler si basa sul classico concetto della triangolazione a partire da una griglia molto fine proiettata sull'oggetto da acquisire; utilizza una video camera come sensore. Il dispositivo non pone difficoltà nel posizionamento in quanto emettitore e sensore sono pre-calibrati.

I modelli offerti sono quattro (C50, C100, C250 e C400) caratterizzati ognuno da una diversa area massima di scansione ed accuratezza.

Steinbichler produce anche uno scanner a luce strutturata denominato **Tricolite** che è caratterizzato da tempi estremamente ridotti di scansione ma una più bassa risoluzione rispetto a Comet. La superficie acquisita può variare per questo modello da 150x150mm fino a 500x500mm; ogni vista richiede meno di un secondo per l'acquisizione con circa 400.000 punti elaborati.

#### Software

Il software fornito a corredo con il dispositivo è minimale e consente soltanto le operazioni basilari di integrazione dei dati acquisiti. Il formato dei dati è comunque compatibile con il pacchetto **PolyWorks** di InnovMetric (<http://www.innovmetric.com/>) per espressa scelta commerciale.

<b>RSI - DigiScan 2000</b>	
Tecnologia	Stripe pattern con shift di fase
Area (mm)	da 150x100 a 1200x800
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	~ 0.6x0.6
Accuratezza (mm)	± 0.2
Velocità (pts x sec)	nd
Durata (sec)	< 2
Colore (res - bit)	nd
Interfaccia (type)	nd
Trasferimento (sec)	—
Hosts	PC Windows NT
Dimensioni (cm)	nd
Peso (Kg)	nd
Costo (Ml)	nd

Table 3.10: Caratteristiche del sistema DigiScan 2000 di RSI (nd - dato non disponibile).

### 3.2.5 VCGScanner [CNR]

<http://vcg.iei.pi.cnr.it/scannerVCG.htm> - Tabella 3.12

Si descrivono qui le caratteristiche dello scanner **3D VCGScanner** sviluppato presso l'ISTI del CNR di Pisa, anche se per correttezza va rimarcato che detto scanner e' attualmente solo un prototipo accademico, caratterizzato da una buona risoluzione di acquisizione ed in fase di sperimentazione sul campo [29]. I componenti di base dello scanner sono dispositivi elettronici di uso comune: un video-proiettore DLP ed una foto-camera digitale. Il video-proiettore proietta un pattern di luce strutturata (insieme di immagini ottenute per suddivisione binaria). Entrambi i dispositivi sono controllati da un personal computer che produce la serie temporale di immagini e sincronizza l'acquisizione. Il pattern utilizzato e' abbastanza particolare (strisce a infittimento progressivo binaria, con l'aggiunta di campi colorati per indexing delle strisce [29]). Un esempio del questo processo ricorsivo di suddivisione è mostrato in Figura 3.10.

Oltre che all'acquisizione di immagini per la ricostruzione della geometria, la foto-camera acquisisce anche immagini in condizioni di illuminazione diverse in modo da ricavare un campionamento del colore della superficie in esame che risulti essere indipendente dalla luce ambientale (albedo). Per definizione, le immagini colore risultano già a registro con la geometria dell'oggetto (range map).

Per ogni sezione esaminata dell'oggetto da acquisire ed in condizioni standard di acquisizione (video-proiettore con risoluzione 1024\*768 e distanza dall'oggetto di circa 1.3m), il sistema VCG3D (mostrato in Figura 3.9) restituisce una mappa di profondità con densità di campionamento di 0.7mm ed una tessitura colore illumination-invariant allineata alla range map stessa.

Una limitazione del sistema, comune tuttavia ai dispositivi che proiettano sequenze temporali di pattern, è che la scena in esame deve risultare assolutamente statica durante il periodo di acquisizione. Il tempo di acquisizione è abbastanza lungo, a causa della limitata banda di trasferimento fornita dalla macchina fotografica digitale (aspetto negativo che bilancia il costo notevol-

<b>Steinbichler - Comet</b>	
Tecnologia	Triangolazione da griglia proiettata
Area (mm)	45x35 (C50)
	95x75 (C100)
	280x180 (C250)
	430x330 (C400)
	35 (40, 82, 82)
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	nd
Accuratezza (mm)	$\pm 0.02$ ( $\pm 0.03$ , $\pm 0.06$ , $\pm 0.1$ )
Velocità (pts x sec)	6,700
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	—
Interfaccia (type)	nd
Trasferimento (sec)	—
Hosts	PC Windows NT
Dimensioni (cm)	27x17x12 (27x17x12, 45x17x14, 45x17x14)
Peso (Kg)	nd
Costo (Ml)	$\approx 100$

Table 3.11: Caratteristiche del sistema Comet di Steinbichler (nd - dato non disponibile).

mente inferiore di una camera digitale ad alta risoluzione rispetto al costo di una videocamera a pari risoluzione).

### Software

Oltre al dispositivo di acquisizione ed ad una interfaccia di pilotaggio dello stesso, il Visual Computing Group del CNR-ISTI sta sviluppando una completa suite di programmi per supportare le varie fasi del processo di acquisizione [30].

<b>CNR - VCGScanner</b>	
Tecnologia	Stripe pattern gerarchico
Area (mm)	> 800x600
Distanza (cm)	130 (messa a fuoco minima del videoproj.)
Risoluzione (mm)	$\sim 0.7$
Accuratezza (mm)	$\pm 0.1$
Velocità (pts x sec)	3,300
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	1792x1200 - 24
Interfaccia (type)	USB + Seriale
Trasferimento (sec)	nd
Hosts	PC Windows*
Dimensioni (cm)	nd
Peso (Kg)	nd
Costo (Ml)	nd

Table 3.12: Caratteristiche del sistema 3D VCGScanner del CNR-ISTI (nd - dato non disponibile).

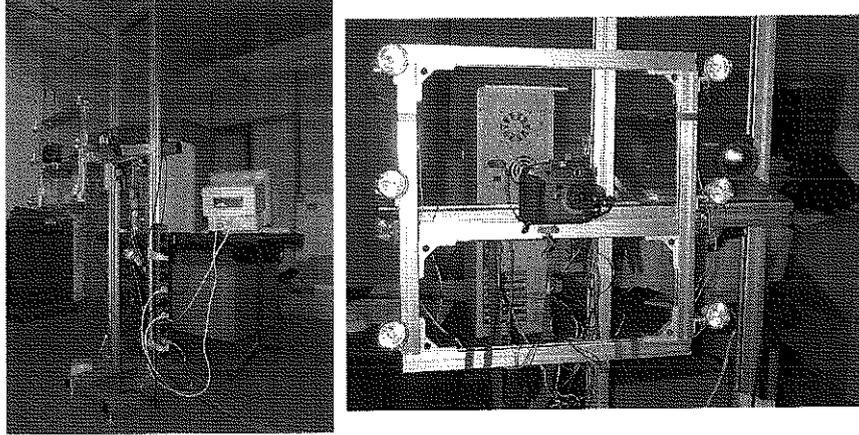


Figure 3.9: Lo scanner 3D a basso costo sviluppato presso l'ISTI del CNR; si basa sull'emissione di luce strutturata e l'uso di elettronica consumer.

### 3.2.6 EOIS: Handy

<http://www.eois.com/> - Tabella 3.13

Lo scanner **Handy** sviluppato dalla Giapponese EOIS (ora inglobata in Opton Co. Ltd. of Japan) è un sistema estremamente compatto (vedi Figura 3.11) e versatile. La sua tecnologia si basa sull'analisi interferometrica dell'effetto Moirè e permette la memorizzazione a bordo di un numero molto elevato di range map (fino a 128).

#### Software

Prevede software di base per l'allineamento, l'editing dei dati e la conversione di formato. Il formato dei dati è compatibile con il pacchetto PolyWork di InnovMetric (<http://www.innovmetric.com/>).



Figure 3.10: L'insieme di pattern RGB utilizzati dal 3D VCGScanner è prodotto mediante suddivisioni ricorsive.

### 3.2.7 Altri sistemi a luce strutturata

Nel corso dell'ultimo anno sono apparsi sul mercato numerosi sistemi basati su luce strutturata. Alcuni di questi sono espressamente progettati per applicazioni in cui si debba acquisire velocemente un volto umano (applicazioni medicali o di tipo entertainment) oppure parti del corpo umano o comunque oggetti potenzialmente non fermi; in questa classe di applicazioni i requisiti generalmente sono: (a) velocità della scansione (possibilmente, acquisizione in real time di oggetti potenzialmente in movimento); (b) scarsa precisione richiesta.

Non presentiamo in dettaglio questi sistemi in quanto le loro caratteristiche non si adattano affatto al nostro contesto applicativo (acquisizione di qualità per applicazioni nel settore Beni Culturali); ci limitiamo a fornirne una sintetica presentazione.

#### Capture 3D: Atos

<http://www.capture3d.com/>

Il sistema **Atos** (Advancend TOPometric Sensor) di Capture 3D si basa sul

EOIS - Handy	
Tecnologia	Interferometria di Moirè
Area (mm)	da 200x200
Distanza (cm)	27
Risoluzione (mm)	0.2x0.2
Accuratezza (mm)	±0.3
Velocità (pts x sec)	15,000
Durata (sec)	<1
Colore (res - bit)	—
Interfaccia (type)	nd
Trasferimento (sec)	nd
Hosts	PC Windows*
Dimensioni (cm)	25x15x10
Peso (Kg)	1.5
Costo (Ml)	nd

Table 3.13: Caratteristiche del sistema Handy di EOIS (nd - dato non disponibile).

classico principio della emissione iterativa di strisce verticali di luce monocromatica ed è caratterizzato dalla presenza di due camere di acquisizione solidali con l'emettitore anzichè una sola camera. Questa soluzione implica una maggiore accuratezza delle coordinate 3D misurate dal sistema (le coordinate sono dapprima calcolate separatamente per ciascuna camera) ma comporta anche una notevole lievitazione del prezzo del dispositivo.

Il dispositivo non prevede l'acquisizione di informazioni colore.

Atos è compatibile con i più diffusi prodotti software per il controllo dell'acquisizione quali quelli distribuiti da GOM MbH (Imageware, InnovMetric, Advanced Design Concepts e Paraform).

#### **Eyetrronics: ShapeSnatcher**

<http://www.eyetrronics.com/>

Prodotto da Eyetrronics Inc. **ShapeSnatcher** si riduce in realtà ad una singola slide ed un pacchetto software. Una volta caricata su un comune proiettore la diapositiva proietta un grigliato abbastanza fitto sull'oggetto da acquisire. La scena viene ripresa da più angolazioni mediante una comune fotocamera digitale. Il software a corredo provvede alla calibrazione della camera, all'allineamento delle mappa di profondità ed alla loro fusione.

Il costo del sistema e' abbastanza contenuto (circa 12 milioni di lire), ma l'accuratezza del campionamento e' modesta.

#### **Tcti**

<http://www.tcti.com/home.htm>

Gli scanner **Tcti** sono caratterizzati dalla velocità di acquisizione, in quanto sono finalizzati alla scansione di oggetti potenzialmente non fissi. Anche in

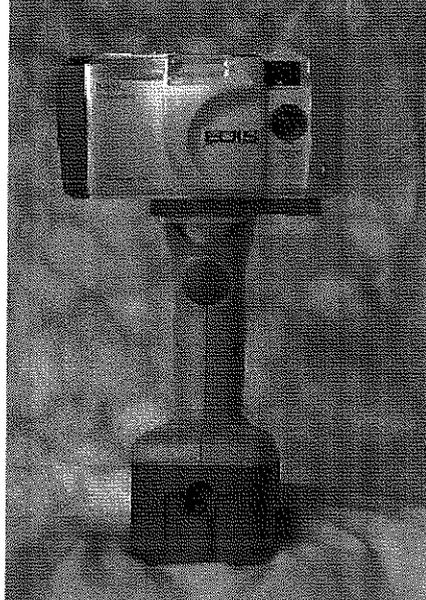


Figure 3.11: Il compatto sistema Handy della EOIS.

questo caso l'offerta commerciale prevede quattro diversi modelli orientati ad altrettante parti del corpo umano: tctiFACE (completa acquisizione facciale), tctiMASK (parziale acquisizione facciale), tctiHEAD (acquisizione della testa a 360 gradi) e tctiBODY (acquisizione del corpo a 360 gradi).

Gli scanner Tcti si basano su una tecnologia denominata DSP (Digital Surface Photogrammetry). In pratica vengono proiettati pattern luminosi random da un'unica sorgente luminosa; la scena è quindi acquisita da molteplici fotocamere digitali sincronizzate tra loro e poste a diversi angoli rispetto la sorgente. La possibilità di camere multiple permette acquisizioni a 360 in tempi inferiori al secondo.

Il costo del sistema è di circa 140 milioni di lire, nel caso del sistema per acquisizione di visi, e di 240 milioni di lire per il sistema full body.

#### **Wicks and Wilson: Triform**

<http://www.wwl.co.uk/>

Il sistema **Triform 3D Head Scanner**, prodotto da Wicks and Wilson Limited, si basa sull'emissione di luce strutturata (si veda la Figura 2.4) e sulla susseguente analisi delle frange di Moiré. WWL commercializza tre diversi modelli per la scansione di corpi interi, busti e visi, rispettivamente.

Il costo del sistema è non è molto basso: circa 50 milioni di lire, nel caso del sistema per acquisizione di visi, e di 170 milioni di lire per il sistema full body.

### **3DMetrics: 3DFlash!**

<http://www.3dmetrics.com/index.htm>

**3DFlash!** è un prodotto specificatamente progettato per l'acquisizione di volti umani. A fronte di una accuratezza geometrica non elevata, il sistema è caratterizzato da una buona qualità delle tessiture colore acquisite. Inizialmente il sistema era denominato *Venus3D*.

Il costo e' nel'ordine dei 20 milioni di lire.

### **The Third Dimension Software: CESL**

<http://www.third.com/CESL/default.htm>

Il sistema **CESL** (Colour Encoded Structured Light) adotta un pattern colorato anziché una sequenza di strisce monocromatiche verticali od orizzontali. La codifica colore adottata rende univoco il riconoscimento delle singole strisce (stripe indexing) nelle immagini acquisite.

Il dispositivo CESL non è caratterizzato da un'alta risoluzione ed accuratezza in acquisizione.

### 3.3 Sistemi a silhouette

In questa sezione illustriamo brevemente alcuni tra i sistemi ottici passivi di maggiore diffusione: i sistemi a silhouette. Data la particolare tecnologia di acquisizione alcuni parametri delle tabelle comparative sono stati necessariamente modificati; in questi casi è opportuno parlare di dimensioni massime dell'oggetto acquisibile piuttosto che area o linea di lavoro.

#### 3.3.1 Dimension3D: 3D ScanBook

<http://www.eois.com/> - Tabella 3.14

Lo scanner **ScanBook** prodotto dalla tedesca Dimension 3D-Systems è costituito da una tavola rotante controllata dal sistema, una camera digitale, due fonti di illuminazione (diffusive) ed un software di controllo della scansione e dell'illuminazione.

Il processo di scansione segue l'approccio descritto in Sezione 2.3. Il modello digitale è estratto da un volume di 512x512x512 voxel. La risoluzione del volume di contenimento usato ovviamente ci permette di calcolare una stima dell'accuratezza del processo: un oggetto di dimensioni di circa 20 cm viene ricostruito usando celle elementari (voxel) dell'ordine del mezzo millimetro; l'errore di approssimazione introdotto è quindi al più di circa 1/2 voxel, ossia pochi decimi di millimetro. Ovviamente, va considerato anche il potenziale errore in acquisizione dipendente dalla presenza di zone concave (non rilevate) sulla superficie dell'oggetto (vedi Sezione 2.3).

Le tessiture hanno una risoluzione di 1024x1024 pixel ed una profondità di 24 bit.

Rispetto alla facilità di uso del sistema, va sottolineato che il processo di post-elaborazione è estremamente semplice da gestire; le consuete fasi di allineamento e merging sono del tutto implicite nel processo di ricostruzione da silhouette, che è quindi abbastanza assimilabile all'approccio "push a button" usuale nel caso della scansione 2D.

Dimension 3D-Systems - ScanBook	
Tecnologia	Ricostruzione da silhouette
Dimensioni max (mm)	da 200x200x250
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	0.3x0.3 (512*512*512)
Accuratezza (mm)	0.4
Velocità	nd
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	1024x1024 - 24
Interfaccia (type)	parallela (scanner-PC)
Trasferimento (sec)	USB (camera-PC)
Hosts	PC MSWin
Dimensioni (cm)	40x42x6
Peso (Kg)	3
Costo (Ml)	10

Table 3.14: Caratteristiche del sistema ScanBook di Dimension 3D-Systems (nd - dato non disponibile).

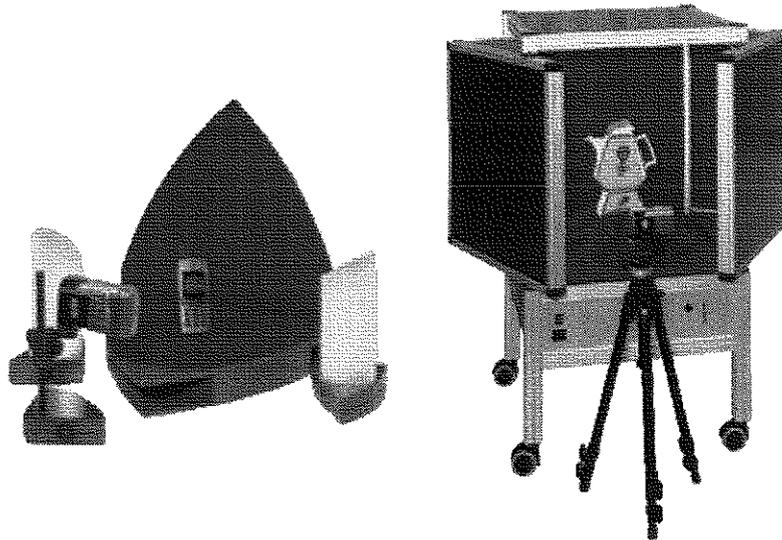


Figure 3.12: I sistemi ScanBook, a sinistra, e ScanStation, a destra.



Figure 3.13: Il sistema cinese TDV.

### 3.3.2 Altri sistemi a silhouette

**Shenzhen Technology Co.**

<http://www.tdv-tech.com/index.html>

La compagnia cinese produce i sistemi **TDV**, una serie di scanner 3D a ricostruzione da silhouette caratterizzati dai diversi volumi di vista trattabili (da 40x40x30 cm a 150x150x150 cm). Supportano l'acquisizione dell'informazione di colore, ma con qualità abbastanza bassa (valutando un esempio di risultato pubblicato su web).

Non sono note le caratteristiche tecniche e commerciali (costi).

<b>Dimension 3D-Systems - ScanStation</b>	
Tecnologia	Ricostruzione da silhouette
Dimensioni max (mm)	da 500x500x800
Distanza (cm)	nd
Risoluzione (mm)	0.5x0.5 (1024*1024*1024)
Accuratezza (mm)	0.4
Velocità	nd
Durata (sec)	nd
Colore (res - bit)	2048x2048 - 24
Interfaccia (type)	parallela (scanner-PC)
Trasferimento (sec)	USB (camera-PC)
Hosts	PC Windows*
Dimensioni (cm)	84 x 68 x 130
Peso (Kg)	12
Costo (Ml)	30

Table 3.15: Caratteristiche del sistema ScanStation di Dimension 3D-Systems (nd - dato non disponibile).

## Chapter 4

# Valutazioni Comparative e Conclusioni

Come accennato nel riassunto iniziale, lo scopo di questa trattazione è stato di fornire uno stato dell'arte ed una rassegna delle tecniche e dei dispositivi commerciali adottabili in un particolare campo applicativo, ossia la produzione di modelli digitali 3D di oggetti artistici. La ricerca alla base di questo lavoro si inquadra nel Progetto Parnaso *"Ecumene: strumenti per la diffusione telematica di conoscenze sul patrimonio storico-artistico ed archivistico della Chiesa Cattolica in Italia"*, ed allo stesso tempo nelle altre attività del gruppo Visual Computer del CNR (vedi Progetto Finalizzato CNR "Beni Culturali" od il progetto RIS+ coordinato dalla Regione Toscana).

In questo quadro di riferimento, ci preme elencare e discutere brevemente quelle che sono le caratteristiche di riferimento che devono essere soddisfatte da uno strumento di acquisizione, e giustificare una particolare scelta tecnologica operata in questa prima fase di progetto.

### 4.1 Criteri e vincoli per una scelta tecnologica

Le caratteristiche particolari del settore di intervento di questo progetto ci portano a delineare i seguenti parametri e caratteristiche che determineranno la nostra scelta:

- **Accuratezza:** il sistema di acquisizione dovrà essere dotato di una buona accuratezza (vale a dire precisione nella misura della geometria), in quanto i modelli digitali dovranno prestarsi ad usi molto differenziati: dalla semplice presentazione visiva (anche in ambito web, cosa che non richiede di per sé elevati livelli di accuratezza geometrica, stanti gli attuali colli di bottiglia nel trasferimento dei dati su rete), ad applicazioni di catalogazione e uso nel restauro (ove invece l'accuratezza è un parametro fondamentale).
- **Risoluzione:** un altro parametro importante è la risoluzione del dispositivo, vale a dire la densità di misura dei punti sulla superficie. Una maggiore risoluzione permette di ottenere modelli digitali più definiti. Il vincolo sull'accuratezza di campionamento e sulla risoluzione, porta a

scartare sia le tecnologie basate sul processo a silhouette che buona parte degli scanner a luce strutturata.

- **Compattezza e trasportabilità del sistema:** le scansioni in questo contesto applicativo avvengono in genere direttamente nel luogo di residenza del reperto (museo, chiesa o palazzo), e solo molto raramente in ambienti controllati quali ad esempio un laboratorio attrezzato. Ciò implica che un controllo accurato dell'ambiente di ripresa sarà molto raramente possibile, e porta ad escludere a priori tecnologie di ripresa che lo richiedano (ad esempio, quelle che per localizzare i punti di ripresa fanno affidamento a sensori di tipo magnetico). Caratteristiche estremamente importanti dello strumento saranno quindi le seguenti: la facile trasportabilità dello strumento; il richiedere una veloce procedura di installazione (alcuni sistemi richiedono noiose fasi di calibrazione, che allungano molto i tempi di lavoro soprattutto ove sia necessario calibrare il sistema ogni qual volta che se ne modifica il posizionamento spaziale); una facile maneggiabilità dello strumento nella zona di ripresa, per permettere di gestire situazioni in cui l'oggetto da acquisire sia contiguo ad ostacoli o posizionato in spazi ristretti (in ciò, i sistemi che permettono di focalizzare anche a distanze ridotte sono preferibili).
- **Indipendenza dalle condizioni ambientali:** un parametro collegato al precedente è la sensibilità alle condizioni ambientali, alcuni tipi di scanner hanno bisogno infatti di operare in regime di illuminazione controllata, cosa spesso molto difficile da ottenere "in situ". Molto spesso gli scanner basati su luce laser risultano meno sensibili alla luce ambientale.
- **Facilità di uso:** soprattutto ove si pianifichi una campagna di acquisizione di discreta entità, la facilità di uso dello strumento e la sua velocità sono un aspetto importante. Da questo punto di vista, sistemi che permettano l'acquisizione di una range map sono in genere preferibili a sistemi a singola linea (o addirittura a campionamento puntiforme). Va però sottolineato che il tempo effettivo di acquisizione delle range map è tutto sommato solo una piccola parte del tempo globale, in quanto il post-processing software (allineamento, merge, semplificazione e/o editing) richiede tempi che sono da due a tre volte il puro tempo di ripresa delle range map. Da questo punto di vista, più che il tempo di pura scansione della singola range map, andrebbe valutato se il sistema permette di velocizzare la successiva fase di post processing. Un aspetto che contribuisce a snellire molto quest'ultima è la possibilità di rilevare in modo automatico il posizionamento relativo scanner-oggetto per ogni singola ripresa (poiché in questo modo la fase di allineamento è realizzabile in modo automatico e la riduzione di tempo di lavoro può divenire in questo modo notevolissima). Ma come abbiamo visto precedentemente, il rilevamento magnetico presenta delle controindicazioni, ed i sistemi basati su bracci robotici sono in genere caratterizzati da difficile trasportabilità o da limitazioni nella dimensione degli oggetti acquisibili. Una interessante opzione è l'accoppiamento di un piatto rotante ad uno scanner a range map, che permette di effettuare (nel caso l'oggetto da riprendere sia manipolabile e posizionabile sul piano) una serie di scansioni allineabili automaticamente.

- **Acquisizione del colore:** nel settore di riferimento l'acquisizione delle caratteristiche visive degli oggetti (il colore è la prima fra queste) è ovviamente di fondamentale importanza. Come discusso nel primo capitolo, solo pochi strumenti di acquisizione permettono di ricostruire il colore (ed in genere in modo molto approssimato), e quindi si qualificano come possibili candidati nell'effettuare una scelta commerciale. Da questo punto di vista, un'ulteriore evoluzione tecnologica è sicuramente auspicabile.
- **Costo contenuto:** per facilitare una introduzione di queste tecnologie in un settore non particolarmente ricco e disponibile ad investimenti in Italia, la economicità dello strumento di scansione è un altro parametro importante. A tale riguardo, una eventuale riduzione dei prezzi degli strumenti sarebbe sicuramente auspicabile, visto anche il loro veloce grado di obsolescenza.

## 4.2 Conclusioni

Dati tutti i requisiti e desiderata elencati nella sezione precedente, e essendo disponibile un budget che si situava dell'ordine dei 100 milioni di lire, abbiamo operato la scelta operativa qui descritta.

Il livello di accuratezza richiesto ci ha portato ad escludere buona parte degli scanner a luce strutturata. Infatti tra questi gli unici a proporre un'accuratezza simile a quella fornita dai device laser sono i sistemi della Steinbichler e della Optonet, nella fascia di prezzo dei 100 milioni di lire. Purtroppo, entrambi questi sistemi si limitano all'acquisizione della pura geometria<sup>1</sup>, e non permettono di rilevare il colore. Ciò ci ha portato quindi a non considerare il settore dei sistemi a luce strutturata.

Restringendo il campo di azione ai sistemi laser, il parametro costo rende non appetibili sia i sistemi Cyberware che Arius. Tra i sistemi *shape+color*, il nuovo Minolta Vivid 900 ci è sembrato molto concorrenziale per la sua innovatività (il sistema è appena stato lanciato sul mercato da Minolta, e rappresenta un consistente avanzamento rispetto ai precedenti sistemi della stessa casa), per il costo sostenibile, per l'accuratezza (valutata sperimentalmente in una sessione di demo su oggetti campione di provenienza museale) ed infine per la possibilità di riscrittura di alcune parti del software di gestione. Il sistema non è una scatola chiusa, ma è corredato di una libreria di basso livello che rende possibile by-passare il driver di gestione Minolta e di definire delle routine di gestione personalizzate, con cui ad esempio contiamo di poter migliorare la qualità di acquisizione del colore.

Una altro fattore non secondario nella definizione di una scelta è l'affidabilità della rete distributiva e di assistenza. Da questo punto di vista, e contrariamente a molti altri produttori esteri, Minolta è presente sul mercato nazionale in modo diretto con una filiale, ha dimostrato notevole interesse alla promozione degli

<sup>1</sup> Alla data in cui è stata fatta la selezione, precedente a quella di ultimazione di questa nota per ragioni editoriali, la ditta Optonet non aveva ancora disponibile la versione colore del suo scanner, apparsa successivamente. La tempistica di progetto non ci ha purtroppo permesso di attendere i tempi di commercializzazione del nuovo sistema.

strumenti 3D scanning sul territorio nazionale ed infine è attiva a livello europeo con una sede in Germania che cura tutto il mercato continentale e che può configurarsi come valido partner anche per successive azioni di sviluppo o evoluzione tecnologica.

La nostra scelta si e' quindi orientata verso il sistema Minolta Vivid 900.

## **Acknowledgements**

L'esperienza del gruppo nel settore dell'acquisizione automatica si e' consolidata grazie anche alle attivita' svolte nell'ambito del Progetto Finalizzato CNR "Beni Culturali - Safeguard of Cultural Heritage" ed del Progetto RIS+ finanziato dalla Regione Toscana.

# Bibliography

- [1] L. Alboul, G. Kloosterman, C.R. Traas, and R.M. van Damme. Best data-dependent triangulations. Technical Report TR-1487-99, University of Twente, 1999.
- [2] F. Bernardini and H. E. Rushmeier. 3D Model Acquisition. In *Eurographics 2000, State of the Art Reports Proceedings*, pages 41–62. Eurographics Association, August 24–25 2000.
- [3] F. Bernardini and H. E. Rushmeier. Strategies for registering range images from unknown camera positions. In Brian D. Corner and H. Nurre, Joseph, editors, *Proceedings of the Conference on Three-Dimensional Image Capture and Applications II (3d-image-capture-appl-00)*, pages 200–206, Bellingham, Washington, January 24–25 2000. SPIE.
- [4] P. J. Besl. Active, optical range imaging sensors. *Machine Vision and Applications*, 1:127–152, 1988.
- [5] K. L. Boyer and A. C. Kak. Color-encoded structured light for rapid active ranging. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(1):14–28, January 1987.
- [6] M. Carocci, S. Lazzari, R. Rodella, and C. Sansoni. 3D range optical sensor: analysis of the measurement errors and development of procedures for their compensation. In Richard N. Ellson and Joseph H. Nurre, editors, *Proceedings of the Conference on Three-Dimensional Capture and Applications*, pages 178–188, Bellingham, Washington, January 27–28 1998. SPIE.
- [7] C.S. Chen, Y.P. Hung, C.C. Chiang, and J.L. Wu. Range data acquisition using color structured lighting and stereo vision. *Image and Vision Computing*, 15:445–456, 1997.
- [8] S.E. Chen. Quicktime VR - an image-based approach to virtual environment navigation. In *Comp. Graph. Proc., Annual Conf. Series (Siggraph '95)*, ACM Press, pages 29–38, Aug. 6-12 1995.
- [9] P. Cignoni, C. Montani, C. Rocchini, and R. Scopigno. Pictorial detail acquisition and patching on 3d objects. Technical Report B4-35, I.E.I. – C.N.R., Pisa, Italy, Nov. 1998.
- [10] P. Cignoni, C. Montani, C. Rocchini, and R. Scopigno. Multiple textures stitching and blending on 3d objects. In D. Lischinsky and G. Ward, editors, *Rendering Techniques '99*, pages 119–130. Springer-Verlag Wien, 1999.

- [11] P. Cignoni, C. Montani, C. Rocchini, and R. Scopigno. External memory management and simplification of huge meshes. Technical Report TR-01, I.E.I. – C.N.R., Pisa, Italy, Gennaio 2001.
- [12] P. Cignoni, C. Montani, C. Rocchini, R. Scopigno, and M. Tarini. Preserving attribute values on simplified meshes by re-sampling detail textures. *The Visual Computer*, 15(10):519–539, 1999. (short version appeared in IEEE Visualization '98 Proceedings).
- [13] B. Curless and M. Levoy. A volumetric method for building complex models from range images. In *Comp. Graph. Proc., Annual Conf. Series (Siggraph '96)*, pages 303–312. ACM Press, 1996.
- [14] Brian Curless and Steven Seitz. 3D Photography. In *ACM Siggraph '00 Course Notes, Course No. 19*, August 24th 2000.
- [15] P. Debevec, Y. Yu, and G. Borsukov. Efficient view-dependent image-based rendering with projective texture-mapping. In G. Drettakis and N. Max, editors, *Rendering Techniques '98*, page 14. Springer Wien, 1998.
- [16] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, and John F. Hughes. *Computer Graphics, Principles and Practice, Second Edition*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1990. Overview of research to date.
- [17] M. Garland. Multiresolution modeling: Survey & future opportunities. In *EUROGRAPHICS'99, State of the Art Report (STAR)*. Eurographics Association, Aire-la-Ville (CH), 1999.
- [18] M. Garland and P.S. Heckbert. Surface simplification using quadric error metrics. In *SIGGRAPH 97 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 209–216. Addison Wesley, August 1997.
- [19] R. Jain, R. Kasturi, and B.G. Schunck. *Machine Vision*. Mc Graw Hill, 1995.
- [20] H.P. Lensch, W. Heidrich, and H.P. Seidel. Automated texture registration and stitching for real world models. In *Proc. Pacific Graphics 2000 Conf.*, page (in press), 2000.
- [21] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk. The Digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues. In *Comp. Graph. Proc., Annual Conf. Series (Siggraph '00)*, pages 131–144. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, July 24–28 2000.
- [22] Marc Levoy and Pat Hanrahan. Light field rendering. In Holly Rushmeier, editor, *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 31–42. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, August 1996. held in New Orleans, Louisiana, 04–09 August 1996.
- [23] S.R. Marshner. *Inverse rendering for computer graphics*. PhD thesis, Cornell University, 1998.

- [24] R. Mencl and H. Muller. Interpolation and approximation of surfaces from three-dimensional scattered data points. In *Eurographics'98 STAR -State of The Art Reports Proceedings*, pages 51–68, 1998.
- [25] Peter J. Neugebauer and Konrad Klein. Texturing 3d models of real world objects from multiple unregistered photographic views. *Computer Graphics Forum (Eurographics'99 Proc.)*, 18(3):245–255, 1999.
- [26] J. L. Posdamer and M. D. Altschuler. Surface measurement by space-encoded projected beam systems. *Computer Graphics and Image Processing*, 18(1):1–17, January 1982.
- [27] K. Pulli. *Surface Reconstruction and Display from range and color data*. PhD thesis, Dept. of Computer Science and Engineering, University of Washington, 1997.
- [28] K. Pulli. Multiview registration for large datasets. In *Proc 2nd Intl Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 160–168. IEEE, 1999.
- [29] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pinci, and R. Scopigno. A low cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum (Eurographics 2001 Conf. Issue)*, 20(3):(in press), 2001.
- [30] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pinci, and R. Scopigno. A suite of tools for the management of 3d scanned data. In *3D Digital Imaging and Modeling Applications of: Heritage, Industry, Medicine & Land (Workshop Proc., Padua (I), 3-4 April)*, 2001.
- [31] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, and R. Scopigno. The Marching Intersections algorithm for merging range images. Technical Report B4-61-00, I.E.I. - C.N.R., Pisa, Italy, June 2000.
- [32] H. Rushmeier and F. Bernardini. Computing consistent normals and colors from photometric data. In *Proc. Second Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 99–108, Ottawa, Canada, 1999.
- [33] H. Rushmeier, F. Bernardini, J. Mittleman, and G. Taubin. Acquiring input for rendering at appropriate levels of detail: digitizing a pietá. In G. Drettakis and N. Max, editors, *Rendering Techniques '98*, pages 81–92. Springer Wien, 1998.
- [34] K. Sato and S. Inokuchi. Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging. *J. Robotic Systems*, 2:27–39, 1985.
- [35] R. Tsai. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(4), August 1987.
- [36] H. S. Yang, K. L. Boyer, and A. C. Kak. Range data extraction and interpretation by structural light. In *The First Conference on Artificial Intelligence Applications (Denver, CO, December 5-7, 1984)*, pages 199–205. IEEE, 1984.