

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Valutazione delle prestazioni di sistemi di acquisizione tipo 3D active vision: alcuni risultati

Beraldin, Jean-Angelo; Gaiani, M.

This publication could be one of several versions: author's original, accepted manuscript or the publisher's version. /
La version de cette publication peut être l'une des suivantes : la version prépublication de l'auteur, la version acceptée du manuscrit ou la version de l'éditeur.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

DDD: Rivista trimestrale de Disegno Digitale e Design, anno 2, 2, 2003

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=1d8daa3f-1f2f-4314-8e1a-99d6d12c9693>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=1d8daa3f-1f2f-4314-8e1a-99d6d12c9693>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.



National Research
Council Canada

Conseil national
de recherches Canada

Institute for
Information Technology

Institut de technologie
de l'information

NRC - CNRC

Valutazione delle prestazioni di sistemi di acquisizione tipo 3D active vision: alcuni risultati *

Beraldin, J.-A., and Gaiani, M.
March 2003

* published in DDD - Rivista trimestrale de Disegno Digitale e Design. Ed, Poli. Design,
Year 2, n.5 - Jan/Mar 2003, pp. 115-128. NRC 45823.

Copyright 2003 by
National Research Council of Canada

Permission is granted to quote short excerpts and to reproduce figures and tables from this report,
provided that the source of such material is fully acknowledged.

Valutazione delle prestazioni di sistemi di acquisizione tipo 3D active vision: alcuni risultati

J-Angelo Beraldin
Institute for Information Technology
National Research Council Canada
Ottawa, Ontario, Canada, K1A 0R6
angelo.beraldin@nrc.ca

Marco Gaiani
Dipartimento INDACO
Politecnico di Milano
Milano, Italy
marco.gaiani@polimi.it

Abstract

Grazie ai recenti progressi tecnologici è oggi possibile costruire sistemi a luce strutturata per l'acquisizione 3D affidabili, ad alta risoluzione ed accurati. In occasione dell'apertura del Laboratorio di Reverse Modeling del Politecnico di Milano, sono state effettuate delle sperimentazioni per la definizione dei dispositivi di acquisizione 3D a luce strutturata per il settore del disegno industriale di prodotto. Partendo da questi casi studio, nel presente scritto vengono analizzati vari aspetti relativi ai sistemi di visione 3D, evidenziando in particolare le tematiche connesse all'accuratezza delle prestazioni metrologiche e alla risoluzione spaziale.

Introduzione

Nel 2001 la Facoltà del Design del Politecnico di Milano ha dato il via alla realizzazione di una serie di laboratori strumentali di supporto alla didattica e alla ricerca, tra cui un nuovo Laboratorio di Reverse Modeling & Virtual Prototyping (vedi DDD n.1, 2002). Questo laboratorio si propone come un insieme di spazi, attrezzature e risorse, rivolto alla formazione di un sistema polivalente, la cui funzionalità di base è di fornire tutti gli strumenti necessari alla formazione dell'allievo di Disegno Industriale nel processo di progettazione e formazione del prototipo digitale, inteso come simulazione del reale in tutti i suoi aspetti (formali, funzionali, strutturali), dagli oggetti di Product Design fino all'Interior Design. La struttura si propone inoltre come sistema di supporto per attuare itinerari formativi progettuali curricolari e post-curricolari, nell'ambito della sperimentazione di metodologie didattiche innovative. Infine, il Laboratorio di Reverse Modeling & Virtual Prototyping si prospetta come laboratorio di sperimentazione di ricerche collegate alla didattica nei campi della visualizzazione virtuale e dell'acquisizione di dati 3D in forma e colore. In particolare, risulteranno campi prevalenti di ricerca le applicazioni al Disegno Industriale relative a:

- Tecniche di modellazione 3D
- Reverse engineering
- Prototipazione rapida
- Visualizzazione e simulazione
- Generazione pratica dei modelli dai dati acquisiti
- Tecniche di Illuminazione e Ombreggiatura per applicazioni interattive
- Virtual Reality & mondi virtuali
- Grafica real-time
- Digital mockup
- Animazione 3D al computer
- Tecniche di modellazione
- Modellazione image-based

Per quanto riguarda nello specifico le attività didattiche, scopi del Laboratorio di Reverse Modeling sono:

- svolgere didattica curricolare a classi di 30 studenti
- svolgere didattica extra-curricolare nell'ambito di master, dottorati di ricerca, corsi di perfezionamento
- svolgere attività di sperimentazione didattica e nella ricerca di base legata all'acquisizione di forme 3D.

A fronte di questi usi previsti, la tipica problematica nell'acquisizione 3D per il Disegno Industriale di prodotto è legata essenzialmente all'acquisizione della forma, raramente del colore, non essendo tanto un rilievo ai fini della catalogazione quanto un rilievo ai fini della ri-progettazione dei manufatti o per la creazione della "matematica" di modelli fisici.

Il campo d'applicazione è quello dell'acquisizione d'oggetti dalle dimensioni inscrivibili entro un cubo, con misure che vanno da un minimo di circa $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ad un massimo di $250 \times 250 \times 250 \text{ cm}^3$. Oggetti oversize sono ascrivibili solamente ai campi del Transportation Design, ma raramente la carrozzeria o l'interno di un mezzo di trasporto richiedono un'acquisizione con puntualità superficiale nella loro totalità nel contempo dotata di controllo metrico globale. Un ulteriore inquadramento del problema lo possiamo avere osservando la topologia degli oggetti che è tipicamente quella free-form; i manufatti prodotti negli ultimi dieci anni poi sono stati realizzati generalmente a partire da una matematica di base tipo NURBS o comunque da superfici parametriche polinomiali bicubiche.

La precisione (ovvero l'incertezza della misura) necessaria sulla singola misura può variare tra 0,5 e 0,02 mm, secondo la natura dell'oggetto, del materiale con cui è realizzato e della procedura di realizzazione. Questi requisiti, uniti all'assenza di necessità di rilevamento del colore e alla possibilità di trattare liberamente gli oggetti rilevati servendosi di tecniche non invasive, danno la possibilità di ricoprire la superficie da misurare con un leggero strato di polvere tipo talco, fino a spessori di qualche micron, senza generare alterazione dei risultati. In generale, comunque, la natura del Laboratorio di Reverse Modeling & Virtual Prototyping lascia supporre in generale la necessità di digitalizzare oggetti dalle dimensioni inferiori a 1 m^3 e con accuratezze assai limitate trattandosi di prototipi fisici di studio realizzati manualmente, solitamente con metodologie abbastanza approssimative.

Altra particolarità è data dai materiali di solito impiegati, che presentano ampi fenomeni di comportamento non-lambertiano alla riflessione della luce e fenomeni di trasparenza. Se i materiali più frequenti sono polistirolo espanso e legno, è altrettanto vero che è possibile incontrare frequentemente lamiera lucidata, plexiglas, polimetilmetacrilato, poliuretano espanso, ecc. In queste condizioni le migliori tecniche d'acquisizione sono certamente ottenute servendosi di tecnologie a luce strutturata (active range camera), in grado di collezionare in poco tempo dense e accurate nuvole di punti e di oltrepassare i tipici problemi dei sistemi di acquisizione che utilizzano l'energia luminosa presente nell'ambiente (tipicamente la fotogrammetria) e dei sistemi tipo CMM (Coordinate Measuring Machines). Relativamente al campo in oggetto queste ultime sono infatti procedure lente, presentano limitazioni nell'acquisizione di intere superfici, dipendenza dalla necessità di avere parti meccaniche ingombranti a contatto con l'oggetto da misurare, elevata possibilità di errori dovuti all'operatore. Occorre tuttavia notare in questa sede per completezza come le procedure CMM siano sì lente, ma molto accurate e per questo non escludiamo l'uso di sistemi CMM in casi particolari che richiederanno alti livelli di accuratezza (0.001 a 0.005 mm).

Nei mesi di ottobre e novembre del 2002 è stata condotta una sperimentazione per la definizione dei dispositivi di acquisizione del nuovo Laboratorio di Reverse Modeling, in cui i parametri di raffronto sono stati:

- usabilità ai fini didattici del sistema
- accuratezza del sistema
- precisione globale del modello ottenuto
- costo del sistema
- semplicità, rapidità e basso costo di manutenzione.

La sperimentazione è stata condotta relativamente al caso di cinque sistemi di acquisizione aventi tecnologie di base, classi di prestazione, integrazione delle soluzioni e costo assai differenti e dunque non commensurabili tra loro se non nell'integrale complessivo dei sistemi. Un sesto sistema sperimentato non è disponibile a livello commerciale, ma è stato usato

nell'ambito della collaborazione tra il Politecnico di Milano e il National Research Council (NRC) canadese.

In questa sede, relativamente all'esperienza condotta, interessa solo l'aspetto dell'accuratezza e delle prestazioni metrologiche, quali l'incertezza delle misure e la risoluzione spaziale.

Acquisizione di informazioni sulla forma dei manufatti

Per "visione tridimensionale attiva" si intende un'attività di estrazione di informazioni a partire da geometria e texture delle superfici visibili in una scena, di indagine e manipolazione sui dati e, infine, di comunicazione dei risultati. Grazie ai recenti progressi tecnologici, è oggi possibile costruire sistemi a luce strutturata per l'acquisizione di dati tridimensionali affidabili, ad alta risoluzione ed accurati. Al fine di trarre pieno vantaggio da questi sistemi, è necessario comprendere non solo i loro vantaggi, ma anche le loro limitazioni. Questo scritto riguarda alcune importanti tematiche che devono essere esaminate prima di cimentarsi in un processo o in un progetto di modellazione tridimensionale. I principi fisici di base che caratterizzano la maggior parte di questi sistemi sono affrontati in un altro scritto dell'autore (Beraldin 2000) e nell'articolo di Roberto Scopigno su questo stesso numero di DDD. Viceversa, sono trattati in questa sede i problemi di risoluzione, incertezza e accuratezza delle misure di informazioni 3D nel contesto di sistemi attivi tridimensionali a corto raggio di azione, con vari esempi che illustrano questi argomenti. L'obiettivo non è quello di rilevare tutti i sistemi commerciali di visione 3D o presentare una lista di test esaustiva dei sistemi scelti per questo scritto. Viceversa, sono presentate alcune teorie che riguardano il 3D sensing, accompagnate da risultati selezionati in grado di evidenziare al lettore alcuni aspetti che possano renderlo più critico nell'osservazione di un sistema di visione 3D. Infine sono elencati vari riferimenti, per aiutare ulteriormente i lettori nello studio di questi argomenti salienti.

Active 3D sensing

Il desiderio di acquisire una forma servendosi di mezzi ottici è databile agli albori della fotografia. Intorno al 1860, François Villème inventò e commercializzò un processo noto come "foto-scultura", che usava 24 macchine fotografiche analogiche (vedi Newhall 1958). Sfortunatamente, dal punto di vista commerciale il processo di foto-scultura richiedeva un forte investimento in termini di macchine fotografiche, sistemi di proiezione e riproduzione, e manodopera specializzata per rendere il sistema operativo. Inoltre, alla fine del processo, era necessario uno scultore professionista per completare il lavoro (Rioux 1994, 1997). È solo con l'avvento dei computer, oltre un secolo dopo, che il processo di acquisizione della forma tramite mezzi ottici ha riguadagnato un forte interesse. Negli ultimi venti anni vi sono stati innumerevoli progressi nel campo dell'elettronica dello stato solido, della fotonica, della computer vision e della computergraphics: tecniche di misura senza contatto come quelle basate sulla luce strutturata (active 3D vision) e sullo stereo passivo sono esempi dei campi che hanno tratto beneficio da tutti questi sviluppi (cfr. Handbook of Computer Vision 1999).

Come illustrato in Beraldin 2000, i metodi di active 3D sensing ottenuti utilizzando onde di luce possono essere suddivisi nelle seguenti categorie principali.

- ❖ Triangolazione (da 0.1 cm a 200 cm)
 - Misura a punto singolo e a profilo
 - Misura d'area
 - Scansione laser basata su galvanometro
 - Movimento meccanico di scanner laser montato su binari, motori per rotazione, bracci articolati e macchine di misurazione coordinate (CMM)
 - Proiezione di punti multipli e linee basata su graticci di diffrazione
 - Proiezione di pattern a frange e codificati attraverso proiettori tipo schermi a cristalli liquidi

- *Effetto moiré*
- *Scanner portatili basati su metodi di estrazione dell'informazione della forma computazionalmente intensivi*
- ❖ Tempo di propagazione e coerenza della luce
 - Tempo di volo (100 cm to \approx km)
 - *Scansione a punto singolo e basata su specchi tramite laser a impulsi, schemi di modulazione AM e FM*
 - *Pieno campo tramite piastre micro-channel o chip al silicio costruiti appositamente.*
 - Interferometria e Olografia (vasto raggio di distanze)

Dedichiamo ora la nostra attenzione verso alcuni aspetti relativi all'influenza dell'interazione luce-materia sulla qualità della misurazione 3D.

Materiale dei manufatti e caratteristiche delle superfici

Solitamente si dice che, con l'approccio tramite luce strutturata, è richiesta la minima assistenza dell'operatore per generare coordinate tridimensionali, e che le informazioni 3D diventano relativamente insensibili all'illuminazione presente nell'ambiente e alla qualità di finitura della superficie. La prima affermazione è certamente vera, se confrontiamo i sistemi a luce strutturata con quelli basati sui sensori a contatto o, ancor di più, se li compariamo con righelli e stecche metriche. Tuttavia, occorre ricordare che non tutte le informazioni 3D sono affidabili (Paakkari 1992, El-Hakim 1994,1995 e Marshall 2001). L'affermazione relativa alla texture della superficie viceversa è, in qualche modo, vera solo fino a quando le tecniche di messa a fuoco e di elaborazione dell'immagine sono usate oculatamente. Inoltre, non bisogna dimenticare che l'ipotesi alla base delle misurazioni geometriche tramite sistemi ottici a luce strutturata presuppone che la superficie rappresentata sia **opaca e rifletta diffusamente**. Quindi non tutti i materiali possono essere misurati accuratamente come l'alluminio trattato con l'idropulitura: i problemi nascono quando si cerca di misurare il vetro, la plastica, i metalli lavorati a macchina oppure il marmo. Come è indicato in Godin 2001, "*marble departs from this hypothesis, and exhibits two important optical properties in this context: translucency, and non-homogeneity at the scale of the measurement process. This structure generates two key effects on the geometric measurement: a bias in the distance measurement, as well as in increase in noise level, when compared to a reference opaque surface*".

Inoltre è un fattore importante il **tipo di caratteristica** misurata, poiché influenza l'accuratezza di un dispositivo di misura fondato sulla visione. L'accuratezza di sistemi a luce strutturata per la misura 3D viene meno quando le misurazioni sono effettuate su oggetti con discontinuità accentuate, come angoli, buchi e mire (target). Ciò significa che un sistema basato soltanto sul raggio d'azione non fornirà sufficienti dati per queste applicazioni. L'integrazione del range e dell'intensità dei dati per migliorare le misurazioni tridimensionali basate sulla visione ha dimostrato di funzionare bene (El-Hakim 1995). Per questo motivo, la selezione di un sistema di visione per una particolare applicazione deve prendere in considerazione la capacità del sistema di misurare le caratteristiche che interessano con l'accuratezza richiesta. Dal punto di vista dei sistemi a luce strutturata, in un ampio numero di applicazioni sono necessarie differenti tipi di caratteristiche per rappresentare pienamente un oggetto.

Nelle fasi di lavorazione, un oggetto è rappresentato da entità geometriche: vertici (punti), contorni (bordi) e superfici. Inoltre anche i parametri topologici o le relazioni tra queste entità fanno parte della rappresentazione dell'oggetto. In alcuni oggetti, come certe tipologie a poliedri oppure semplici fogli di metallo, i vertici e i contorni possono essere sufficienti. Tuttavia, molte altre tipologie d'oggetti di produzione industriale richiedono la misurazione di superfici curve o free-form. La capacità di un sistema basato sulla visione di estrarre e misurare accuratamente questi differenti tipi di primitive varia da una tecnologia all'altra. Oltre a

ciò, molte applicazioni (come quelle adottate nel settore dei Beni Culturali) non consentono alcuna alterazione dell'oggetto per far sì che esso si adatti al sistema di visione (come ad esempio la possibilità di posizionamento di marker oppure la modifica della riflettività della superficie).

Calibrazione e valutazione di dispositivi di misura della distanza

Il risultato di una misurazione ha significato soltanto se il suo grado di incertezza è noto. Citando una famosa frase di Sir William Thompson, noto come Lord Kelvin (1824-1907): *"When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge of it is of a meagre and unsatisfactory kind: it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced it to the stage of science"*. Queste parole riassumono l'importanza di conoscere le modalità secondo cui un sistema 3D misura quantità fisiche.

La definizione del grado di incertezza è solitamente basata sul riscontro con standard che risalgono alle unità nazionali (unità SI), come richiesto dalla ISO 9000-9004 (Marshall 2001). Ad esempio, i produttori di teodoliti possono usare la sezione 3 dello standard tedesco DIN 18723, mentre i produttori di CMM possono utilizzare lo standard ISO 10360-2:1994 per valutare i loro meccanismi di misurazione. In Germania sono in corso di preparazione le linee guida VDI/VDE 2634 per particolari sistemi di visione 3D a base ottica, che contengono i test di accettazione e le procedure di monitoraggio utili ai fini pratici della valutazione dell'accuratezza di sistemi ottici di misurazione 3D basati sulla scansione di aree. Queste linee guida si applicano a sistemi ottici di misurazione 3D basati sulla scansione di aree, che lavorano sul principio della triangolazione, come ad esempio la proiezione di frange, le tecniche moirè e i sistemi di fotogrammetria e scansione basati sulla scansione di aree (VDI/VDE 2634).

Poiché, tuttavia, non esiste uno standard riconosciuto in campo internazionale od un metodo di certificazione per valutare l'accuratezza, la risoluzione, la ripetibilità o il grado di incertezza delle range camera, per il momento è semplicemente l'utente che deve di volta in volta mettere a punto tecniche per assicurare un certo livello di affidabilità del dato rispetto a ciò che viene misurato.

In questo contesto occorre ricordare come anche la calibrazione e i metodi di verifica, oltre alle definizioni dei termini, sono fondamentali per la definizione e il mantenimento di uno standard.

La calibrazione di qualsiasi dispositivo che sfrutti la luce (strutturata o non) consiste nell'estrazione di parametri interni quando esiste un modello matematico (lunghezza focale, distorsione della lente, parametri di scansione ecc.), oppure in una mappatura delle distorsioni in una tavola con valori di riferimento, nel caso in cui alcuni elementi non possano essere modellati accuratamente. Realizzata la calibrazione, le misurazioni spaziali sono disponibili in un sistema di coordinate rettangolari e possono essere determinate l'accuratezza, la ripetibilità, la risoluzione e le incertezze nelle misurazioni del dispositivo di acquisizione. Questa fase è nota come verifica e definizioni accurate per tutti i termini relativi a parametri che possono essere estratti in essa sono consultabili nello standard di metrologia VIM (VIM 1993). L'accuratezza può essere misurata con differenti posizioni/orientamenti di un dispositivo di calibrazione (evitando di utilizzare gli stessi punti di controllo) e verificando che esso sia stato costruito con elementi di attrezzatura riconducibili ad uno standard noto. Il laboratorio dell'Institute for Information Technology del National Research Council (NRC) collabora con il gruppo che si occupa di standard del NRC (INMS): questo gruppo fornisce degli standard di lavoro che sono sufficienti per la maggior parte dei sistemi di acquisizione che sfruttano l'energia luminosa sviluppati all'interno Institute for Information Technology. Il laboratorio dispone di una serie

di metodi di verifica, di cui alcuni accurati e facilmente applicabili in ogni situazione e altri altrettanto accurati ma scomodi da utilizzare in ambito extra-laboratoriale (come ad esempio gli scavi archeologici). In pratica, in questa valutazione viene utilizzato un oggetto – distinto dalle attrezzature di calibrazione – la cui accuratezza nota è dieci volte superiore a quella fornita dalla range camera che occorre calibrare.

Un laboratorio dell'Institute for Information Technology del NRC è stato dedicato alla calibrazione e alla valutazione di sensori e sistemi di visione (cfr. Fig. 1). I suoi obiettivi sono:

- 1) effettuare una calibrazione precisa di vari tipi di sensori e di sistemi;
- 2) monitorare la stabilità del sensore nel tempo e alle variazioni delle condizioni ambientali, quali temperatura e luce di ambiente;
- 3) valutare l'accuratezza dei sistemi di misurazione geometrica su un'ampia gamma di oggetti standard appositamente progettati e con strumentazioni di posizionamento di alta precisione;
- 4) validare gli algoritmi di computer vision, come la misura di mire e spigoli, la registrazione di più viste, l'analisi basata sul modello e la fusione di dati provenienti da differenti sensori.



Fig. 1 – Laboratorio di calibrazione dell'Institute for Information Technology-NRC per la calibrazione e la valutazione dei sistemi di misura 3D.

Oggetti con caratteristiche geometriche e qualità delle superfici note sono stati realizzati servendosi di materiali stabili, rigida tolleranza e misurati con un CMM calibrato a $1 \mu\text{m}$ nei laboratori di standard del NRC (INMS). Alcuni di questi oggetti sono usati per la calibrazione e la verifica dei sistemi basati sulla visione (cfr. Figg. 2 e 3).

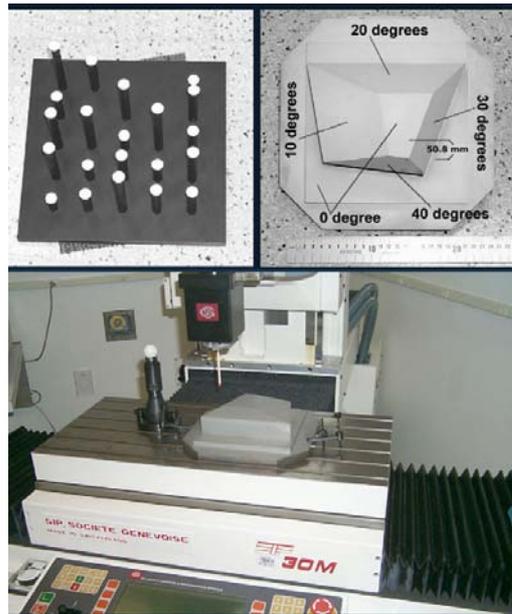


Fig. 2 – In alto: oggetti per la calibrazione e i test utilizzati nell'Institute for Information Technology-NRC. In basso: tastatore per la misura di coordinate utilizzata per verificare gli oggetti 3D.

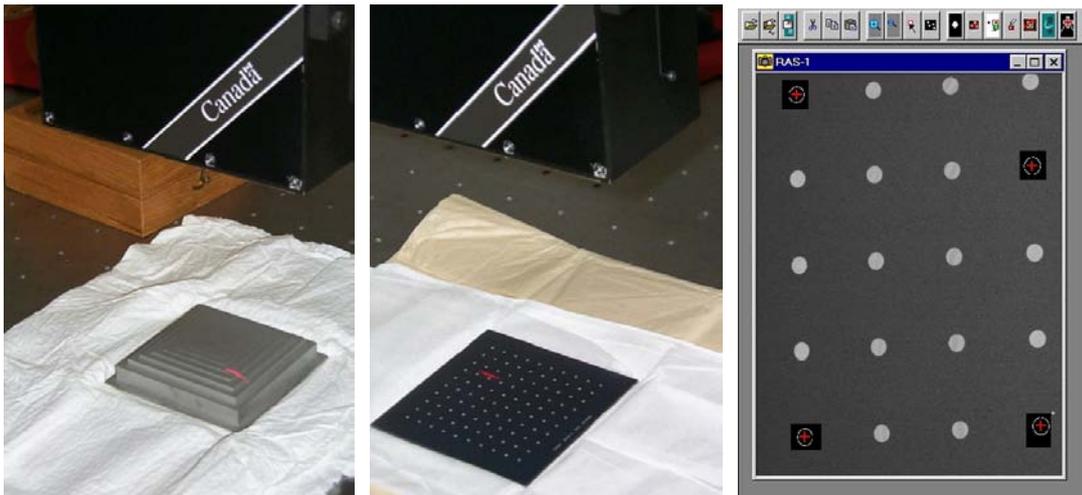


Fig. 3 – Oggetti per la calibrazione e la realizzazione di prove. A sinistra: piramide a gradini. Al centro: sistema di mire a piastra. A destra: target per l'estrazione di coordinate 3D, dopo l'elaborazione delle immagini d'intensità generate dallo scanner laser.

Valutazione delle prestazioni di sistemi di visione 3D

Propagazione e risoluzione spaziale raggio Laser/luce non coerente

La risoluzione della triangolazione ottica è limitata dalla diffrazione del fascio di luce laser. Anche nelle migliori condizioni di emissione (single mode) la luce laser non mantiene collimazione con la distanza. In effetti, quanto più piccolo è il raggio laser, tanto più grande è la divergenza prodotta dalla diffrazione. La figura 4 illustra la limitazione. La linea continua mostra le relazioni tra gli assi X e Y (direzione perpendicolare alla proiezione laser) e le dimensioni fisiche dell'oggetto scansionato. Un'analisi dettagliata di questa proprietà di propagazione può essere ritrovata in Rioux 1994, 1997. I sensori a triangolazione basati sulla proiezione a frange presentano lo stesso problema. Piccole aperture (f-number) per focalizzazione ben contrastata, a fronte di un elevato segnale alto per rapporto al rumore e compattezza sono

requisiti in conflitto tra loro. In questo caso non è fornita alcuna curva, ma dovremmo aspettarci per un dato volume di misure una curva anziché una linea retta.

Incertezza della misura

I limiti di diffrazione impongono una limitazione sulle capacità di risoluzione lungo gli assi X e Y come descritto sopra, ma lungo l'asse di profondità (Z) ci si aspetterebbe un continuo miglioramento all'aumento della potenza del laser. Sfortunatamente questa non è la situazione reale, poiché la coerenza della luce laser produce effetti d'interferenza dannosi che limitano il potere di risoluzione di un sensore di posizione. Questo fenomeno è noto come effetto speckle e tipicamente (per lunghezze d'onda appartenenti al visibile) limita la sensitività della posizione a circa $2\text{-}5\ \mu\text{m}$. Quando questa figura è riproiettata sulla scena, questo errore di misura si traduce spesso in centinaia di micrometri. È importante ricordare questa limitazione in fase di progettazione, poiché prescrive la lunghezza fisica del sensore di posizione e la dimensione del pixel da usare al fine di ottenere la risoluzione desiderata (linea tratteggiata in fig. 4).

Per sistemi a proiezione di frange sebbene, in condizioni operative normali, non sia presente lo speckle, la sfocatura limita la capacità del sistema di misurare accuratamente la forma, specialmente lontano dal miglior punto focale. La mancanza di contrasto dei pattern a frange riduce la capacità di una loro accurata estrazione. Per questo, quando sono presenti elevati livelli di luce ambiente, la scelta migliore è data da sistemi basati sul laser.

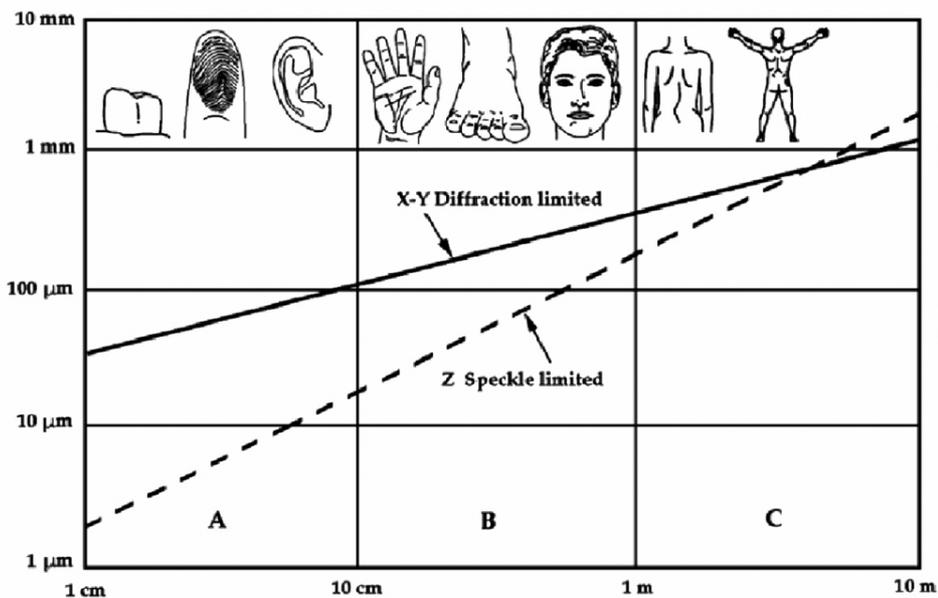


Fig. 4 – Limiti fisici di misurazioni ottiche 3D basate sulla proiezione laser. La linea continua mostra le relazioni tra gli assi X e Y (direzione perpendicolare alla proiezione laser) e le dimensioni fisiche degli oggetti che devono essere scansionati; la linea tratteggiata rappresenta l'incertezza di Z imposta dallo spot del laser (da Rioux 1994, 1997).

La figura 5 mostra il livello di rumore (incertezza) nella misurazione di una bottiglia di sapone in polietilene senza e con uno strato di vernice. Il modello 3D dell'oggetto è presentato usando un'illuminazione sintetica che mette in evidenza la forma generale tridimensionale dell'oggetto ma anche il rumore (dovuta all'incertezza della misura 3D) presente sul modello. Senza vernice (primer), l'allineamento di due riprese 3D fornisce un errore di circa $147\ \mu\text{m}$ (1 sigma). Invece con l'ausilio di una vernice è possibile ridurre quest'errore a soli $57\ \mu\text{m}$ (1 sigma). La 'standard deviation' è usata spesso quando il rumore (incertezza – parte aleatoria) ha un comportamento statistico secondo una curva gaussiana. Come per il marmo (Godin 2001), la misura di questo manufatto con un sistema laser è resa difficile a causa dell'interazione tra materia plastica e laser. Sicuramente si può affermare che il materiale non

è lambertiano e che probabilmente c'è anche un effetto di penetrazione del fascio laser che rende erronea la misura della forma. Per maggiore completezza di osservazione occorrerebbe modellizzare questo effetto, similmente a quanto fatto nel già citato lavoro di Godin e altri per il marmo.

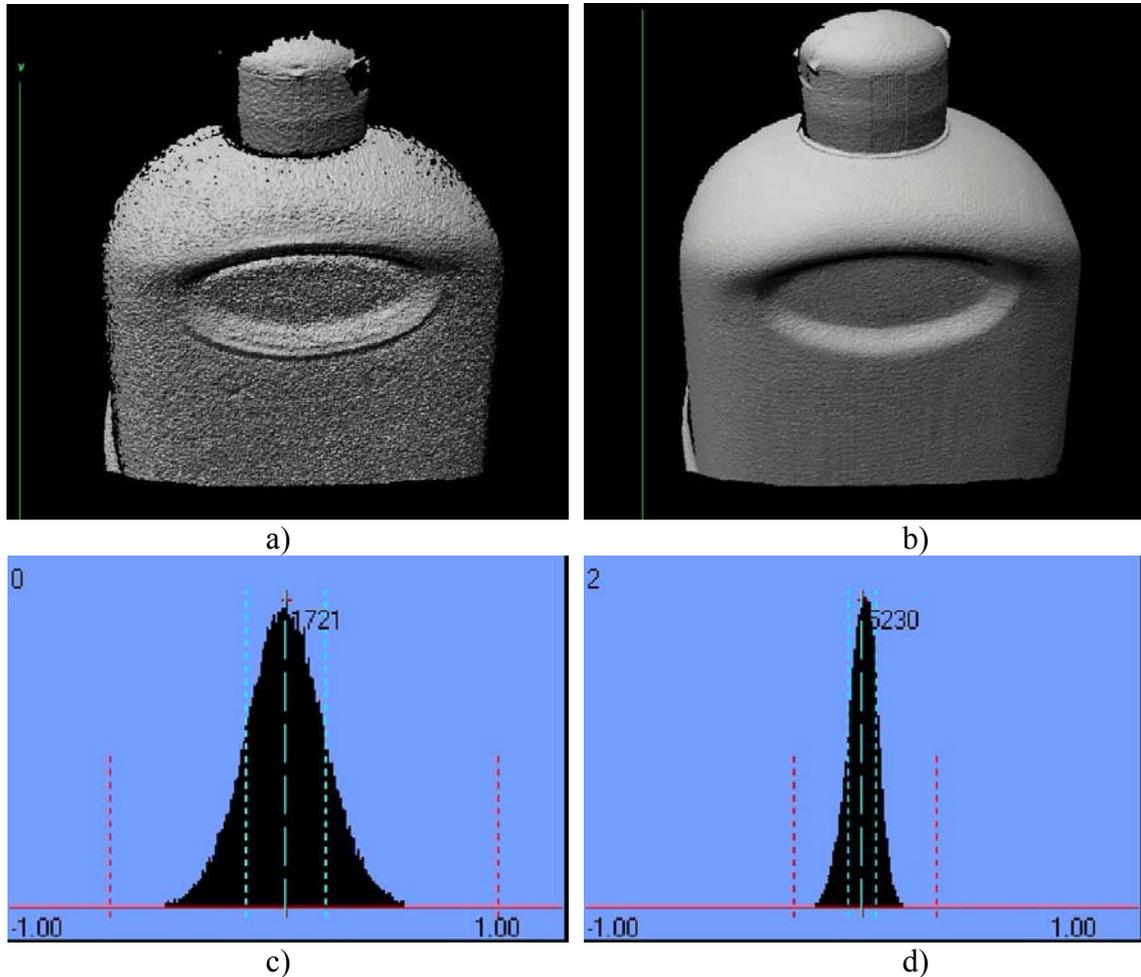


Fig 5 – Misurazioni di una confezione di sapone utilizzando un laser scanner 3D con e senza vernice di tipo "primer" (per coprire in modo uniforme): a) integrazione di due viste (plastica grezza); b) integrazione di due viste (plastica dipinta); c) istogramma che mostra le differenze tra immagini integrate insieme in (a) (1 sigma = 147 μm); d) istogramma che mostra le differenze tra immagini integrate insieme in (b) (1 sigma = 54 μm). Queste immagini sono state ottenute durante un corso di "Active 3D vision: misurazione e modeling" tenuta al Politecnico di Milano.

Nella scelta di una *range camera*, le prestazioni di risoluzione lungo gli assi X e Y e lungo l'asse di profondità (Z) sono fattori importanti per definire la qualità della misura al livello spaziale. Questi due parametri corrispondono infatti, di solito, al requisito di base posto dalle caratteristiche dei manufatti di cui si desidera fare l'acquisizione e dall'applicazione per la quale saranno usati i dati 3D. Per questo nel corso della sperimentazione fatta per definire i caratteri dei sistemi di acquisizione a luce strutturata del nuovo Laboratorio di Reverse Modeling del Politecnico di Milano è stata posta grande attenzione alla risoluzione. La figura 6 mostra un oggetto che è stato misurato con differenti sistemi di acquisizione 3D *active vision* basati sulla triangolazione. Il confronto è stato fatto su due oggetti simili (due esemplari dell'oggetto di produzione industriale riportato in fig. 6) e con un trattamento della superficie analogo. Quattro dei sistemi analizzati sono basati sul laser (sistemi A-D), mentre gli altri due sono basati sulla proiezione di frange (sistemi 1 e 2). La figura 7 mostra il livello di rumore (incertezza) usando un'illuminazione sintetica e il livello di risoluzione spaziale dei diversi sistemi. Tra queste figure, la figura 7d mostra il risultato di un campionamento di 0.05 mm

con il sistema laser D. Questo sistema permette di modellare molto bene i bordi dell'oggetto. Con un campionamento di 0.1 mm, il sistema C arriva ad un buon risultato sul bordo (con incertezza di circa 33 μm), mentre i sistemi A e B riescono ad ottenere solo la forma generale dell'oggetto. Per quanto riguarda i sistemi 1 e 2 basati sulla proiezione di frange, sembra che il limite di risoluzione spaziale sul bordo sia stato raggiunto. Il bordo rimane dunque non ben definito. Il sistema 2 mostra un livello di rumore (incertezza) di 12 μm . In figura 8, sono riportati l'istogramma di incertezza della misura, ottenuto dall'allineamento di due immagini 3D a partire dal sistema laser D (a) e di due immagini ottenute dal sistema a proiezione di frange 1, (b). Le corrispondenti incertezze della misura lungo l'asse di profondità (Z) dei due sistemi sono quasi uguali, circa 12 μm

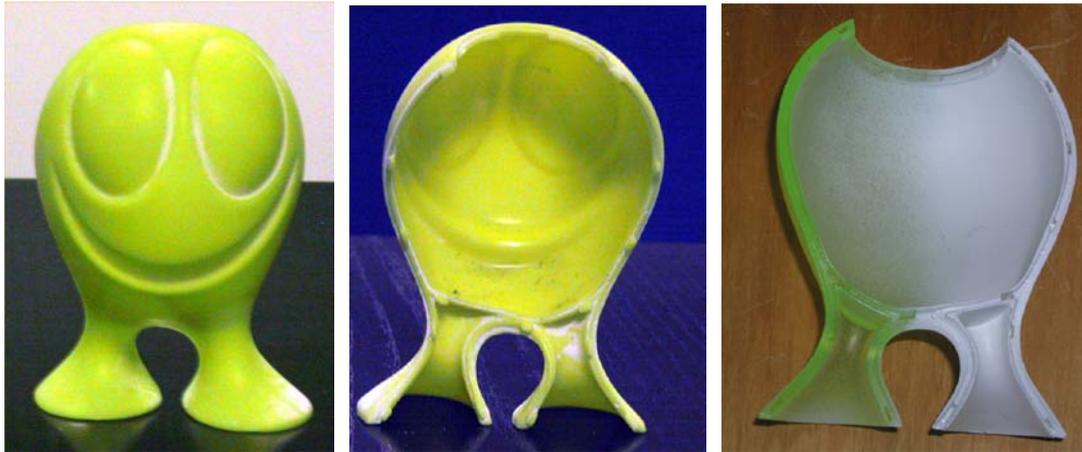
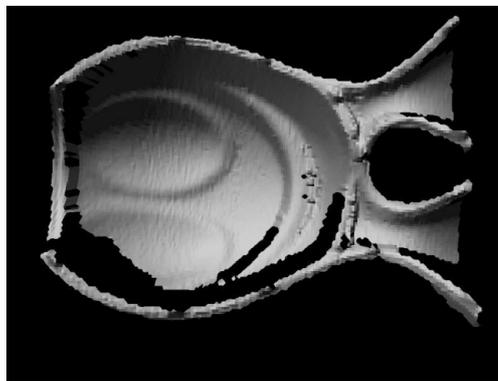
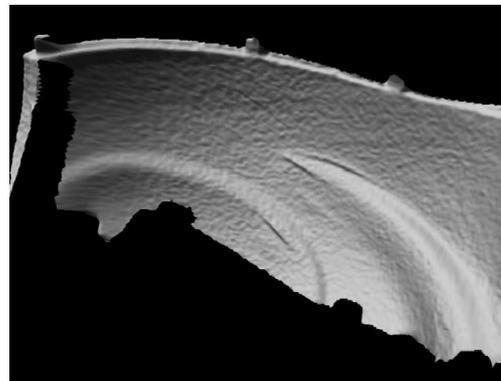


Fig 6 – Oggetto per le prove con bordi arrotondati e a spigolo vivo. Sulla superficie dell'oggetto di plastica è stata messa una vernice di tipo "primer" o polvere.



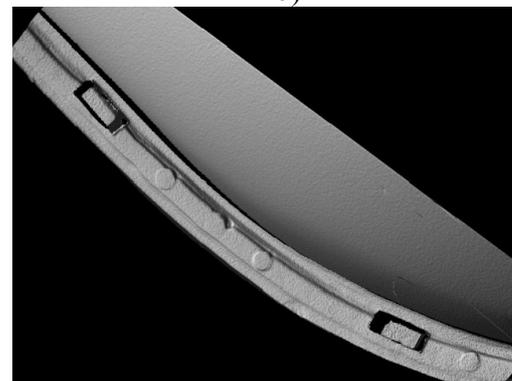
a)



b)



c)



d)

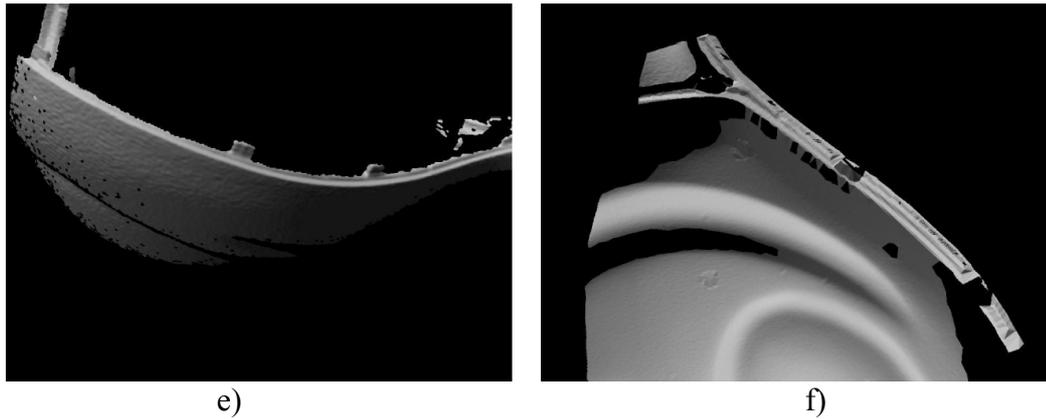


Fig 7 – Test di risoluzione su un'estremità a punta: a) usando un modello A di 3D laser scanner; b) usando un modello B di 3D laser scanner; c) usando un modello C di 3D laser scanner (con un campionamento spaziale di 0.10 mm); d) usando un modello D di 3D laser scanner (con un campionamento spaziale di 0.05 mm); e) usando un modello 1 di sistema di proiezione a frange e f) usando un modello 2 di sistema di proiezione a frange. Queste immagini sono state ottenute dopo aver richiesto alcuni test di scansione da vari produttori di scanner. Non vengono riportati nomi poiché sono necessari ulteriori test per avere un quadro completo della comparazione di sensori di visione 3D. Le linee di riferimento della macchina fotografica non sono qui specificate, ma risultano importanti nella comparazione di sistemi di visioni basati sulla triangolazione.

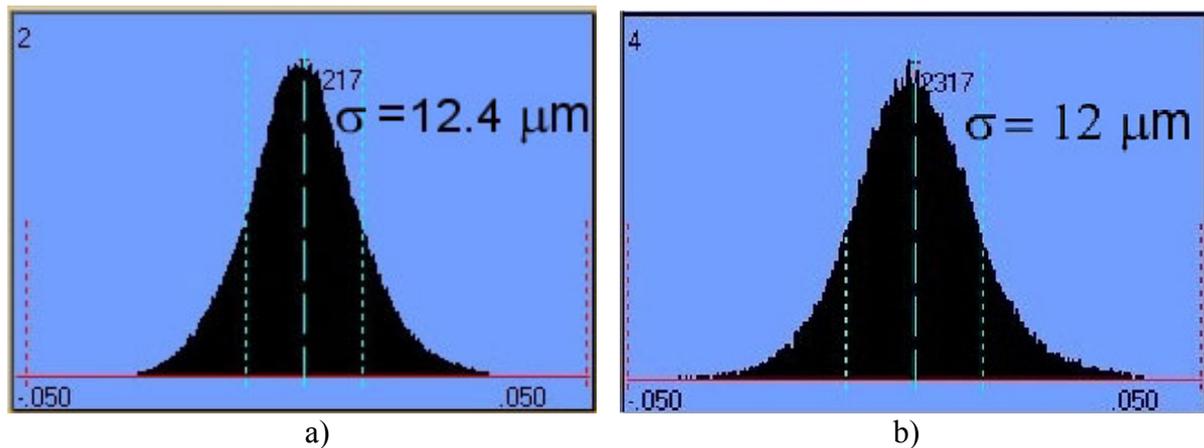


Fig. 8 – Incertezza di misurazione dopo l'allineamento di 2 immagini 3D: a) istogramma che mostra la differenza tra immagini integrate insieme ($\sigma = 12.4 \mu\text{m}$) usando un modello C di 3D laser scanner; b) istogramma che mostra la differenza tra immagini integrate insieme ($\sigma = 12 \mu\text{m}$) usando un modello 2 di sistema di proiezione a frange. Non vengono riportati nomi poiché sono necessari ulteriori test per avere un quadro completo della comparazione di sensori di visione 3D. La *Baseline* dei sistemi 3D non sono qui specificate, ma risultano importanti nella comparazione di sistemi di visioni basati sulla triangolazione.

Discusse la risoluzione spaziale e l'incertezza delle misure (rumore aleatorio), la parte restante è altrettanto importante ed è nota come errore sistematico. Sia i sistemi laser, che quelli basati su frange mostrano questo tipo di errore a differenti gradi e per differenti ragioni. Ciò che è comune ad entrambi è la presenza di fenomeni ondulatori nelle immagini 3D grezze. L'effetto è mostrato in figura 9. Gli errori sistematici possono essere rimossi da un'appropriata progettazione del sensore o di filtraggio delle immagini 3D grezze. Tuttavia il filtraggio altera la risoluzione spaziale e quindi la qualità dei dati acquisiti.

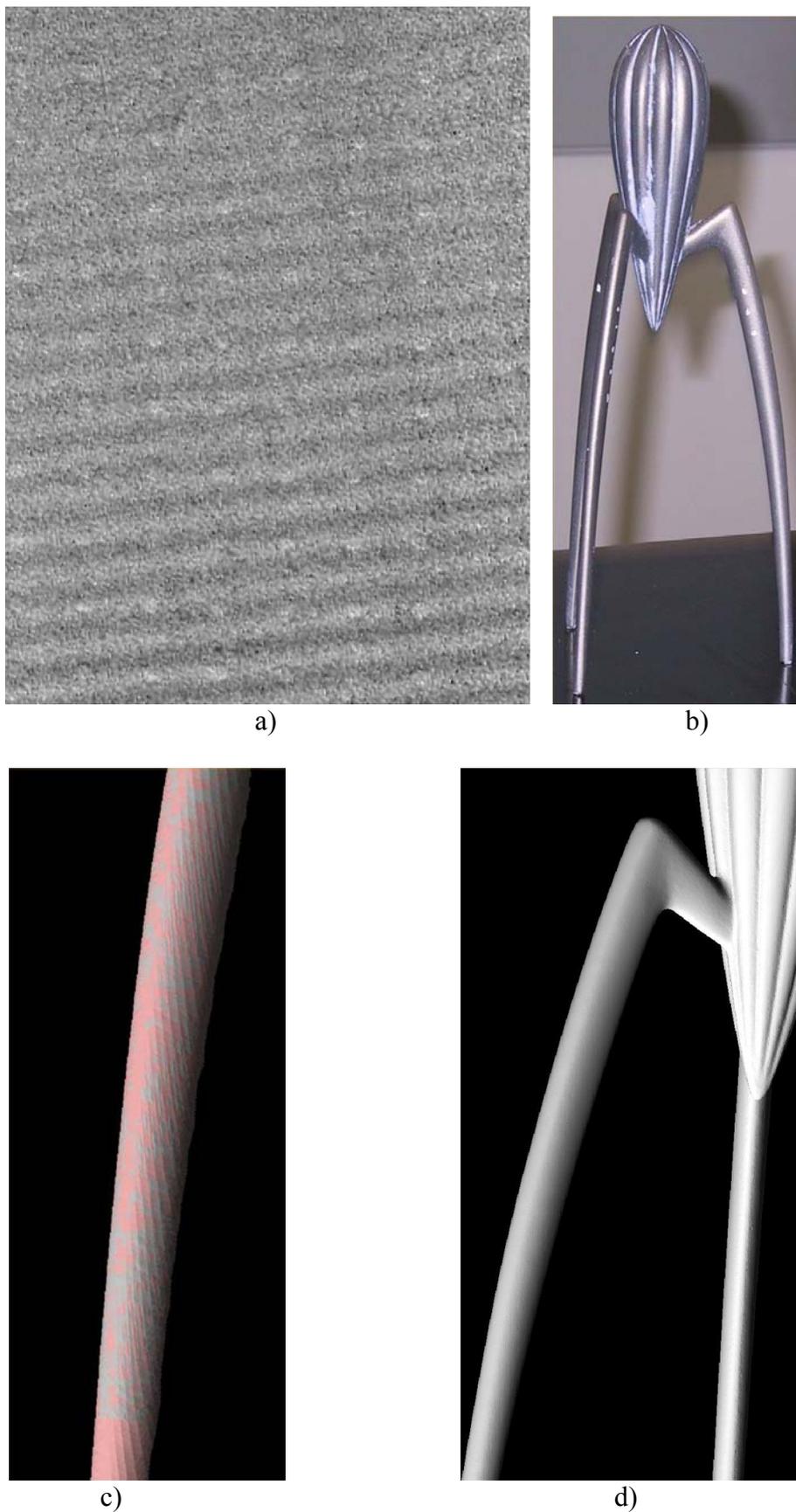


Fig 9 – Fenomeno ondulatorio riscontrato nei laser scanner e nei sistemi di proiezione a frange: a) tipiche ondulazioni su una superficie piatta; b) oggetto per il test; c) ingrandimento di due viste allineate che mostrano ondulazioni; d) modello cui sono state tolte le ondulazioni. Queste immagini sono state ottenute dopo aver richiesto alcuni test di scansione da vari produttori di scanner. Non vengono riportati nomi poiché sono necessari ulteriori test per avere un quadro completo della comparazione di sensori di visione 3D.

Conclusioni

I recenti progressi della tecnologia hanno reso possibile la costruzione di sistemi di acquisizione 3D affidabili ed accurati. Conseguentemente, sia i laboratori di ricerca che le aziende hanno sviluppato vari sistemi di acquisizione di dati tridimensionali. Questi dispositivi, noti altresì come *range camera*, sono altrettanto diversificati quanto le loro applicazioni. Lo scopo della misurazione 3D degli oggetti è quello della documentazione, dell'ispezione o della visualizzazione e la possibilità di tutte queste. In realtà, per il disegno industriale di prodotto, la tipica problematica nell'acquisizione 3D è legata essenzialmente all'acquisizione della forma, raramente del colore, non essendo tanto un rilievo ai fini della catalogazione quanto un rilievo ai fini della ri-progettazione dei manufatti o per la creazione della "matematica" di modelli fisici.

Nel corso dello scritto abbiamo analizzato alcune delle caratteristiche di base come l'incertezza di misura, la risoluzione spaziale e l'accuratezza. Inoltre, abbiamo fornito alcuni risultati di test condotti sia in Italia che in Canada su tipici sistemi di acquisizione 3D a luce strutturata. Ulteriori prove saranno necessarie per fornire un quadro più completo dell'intero campo dei sistemi di acquisizione 3D active vision.

Ringraziamenti

Gli autori sono grati ai numerosi collaboratori che hanno partecipato alla realizzazione dei test presentati in questo testo. Sentiti ringraziamenti vanno anche ai gruppi di studenti che hanno partecipato nel maggio 2001 al corso della Facoltà del Design del Politecnico di Milano "Rilevazioni di superfici 3D mediante luce strutturata".

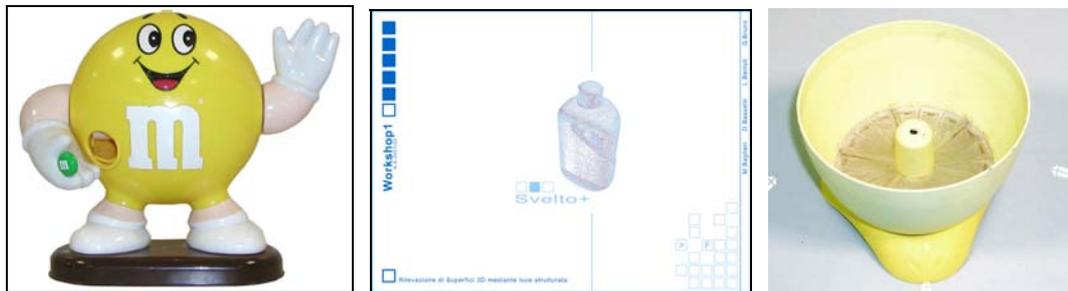


Fig 10 – Alcuni lavori realizzati dagli studenti nel workshop. (consultabili on-line pdf, video a, video b, video c)¹

Gli autori ringraziano inoltre per il loro aiuto Luc Cournoyer e Michel Picard del NRC, che hanno fornito delle immagini 3D ad altissima risoluzione per uno dei test di oggetti, e Grazia Magrassi e Alessandro Neri per aver seguito la campagna di sperimentazioni presso il Politecnico di Milano.

Bibliografia

- [1] Beraldin J.-A., Blais F., Cournoyer L., Godin G., Rioux M., *Active 3-D Sensing, Modelli e Metodi per lo studio e la conservazione dell'architettura storica*, Scuola Normale Superiore, Pisa 10: 22-46; 2000. NRC 44159.
- [2] <http://www.vit.iit.nrc.ca/References/Beraldin Active3D.pdf>
- [3] Rioux M., *Colour 3-D electronic imaging of the surface of the human body*, *Optics and Lasers in Engineering*, 28: 119-135; 1997 NRC Also, SPIE Proceedings, Automatic Systems for the Identification and Inspection of Humans, San Diego, CA. July 28-29, 1994. Vol. 2277. pp. 42-54. NRC 38344

¹ Studenti- Gruppo a: Stefano Alberti, Samuele Bressan, Simone Brezzi, Tommaso Colia, Marco Colombo. Gruppo b: Baglieri Massimiliano, Bassetti Diego, Bertoli Lukasz, Bruno Giuseppe. Gruppo c: Albicini Mattia, Apiani Mauro, Bertoni Riccardo, Biavaschi Nadia, Cavilli Alessandro, Colonna Di Paliano Ascanio.

- [4] Handbook of Computer Vision and Applications. 1999. Volume 1: Sensors and Imaging, Chap. 17-21 Editors B. Jähne, H. Haußecker and P. Geißler, Academic Press, San Diego.
- [5] Godin G., Rioux M., Beraldin J.-A., Levoy M., Cournoyer L., Blais F., *An assessment of laser range measurement on marble surfaces*, 5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 1-4 ottobre 2001, Wien, Austria., NRC 44210. <http://www.vit.iit.nrc.ca/References/NRC-44210.pdf>
- [6] Marshall S.J., Whiteford D.N., Rixon R.C., *Assessing the performance of 3D whole body imaging systems*, Proc. 6th Numérisation 3D/Scanning 2001 Congress, Paris, France, 2001.
- [7] El-Hakim S.F., Beraldin J.-A., Blais F., *A Comparative Evaluation of Passive and Active 3-D Vision Systems*, Proc. Dig. Photogram., St-Petersburg, June 25-30, 1995.
- [8] El-Hakim S.F., Beraldin J.-A., *On the Integration of Range and Intensity Data to Improve Vision-based Three-dimensional Measurements*, Videometrics III, Proc. SPIE 2350, 306-321, 1994.
- [9] Paakkari J., Moring I., *Method for evaluating the performance of range imaging devices*, Proc. Industrial Applications of Optical Inspection, Metrology, and Sensing, SPIE-1821, 350-356, 1992.
- [10] VIM, ISO International Vocabulary of Basic & General Terms in Metrology, 2nd Edition, International Organization for Standardization, Geneva, 1993.
- [11] VDI/VDE 2634 Blatt 2, Optische 3D-Messsysteme – Systeme mit flächenhafter Antastung/Optical 3-D measuring systems - Optical systems based on area scanning, August 2002.



Jean-Angelo Beraldin si è laureato in ingegneria elettronica, B.Eng. presso l'Université de Sherbrooke, nel 1984 ed ha conseguito un M.A.Sc. presso l'University of Ottawa nel 1986. Nel 1986 ha iniziato la sua carriera al National Research Council canadese. Le sue attività di ricerca si svolgono nel campo dell'ingegneria dei sistemi basati su sensori, l'opto-elettronica e della metrologia applicata ai sensori 3D. Ha pubblicato più di 100 articoli, 2 brevetti US e ha partecipato al trasferimento di tecnologia a numerose ditte canadesi. Negli ultimi anni ha collaborato a diversi progetti internazionali: con la NASA, le Università Stanford e Harvard, in Israele, in Cina e con numerosi partner in Italia, tra cui il Politecnico di Milano.



Marco Gaiani è professore Straordinario di Disegno presso la Facoltà del Disegno Industriale del Politecnico di Milano, si è impegnato, nell'ultimo decennio, nello studio e nell'ottimizzazione di metodi e sistemi per il rilievo e la documentazione multimediale dell'architettura, storica e moderna, delle opere di interesse archeologico e della scultura. È autore di numerosi scritti sulla rappresentazione e il rilievo: i suoi lavori sono apparsi in varie riviste, da 'Casabella' a 'Paesaggio Urbano', da 'Disegnare' a 'Parametro', da 'Storia Urbana' a 'IEEE Multimedia', e figurano negli atti di molti convegni: da VSMM '98 e 2001 a 3D Digital Imaging Workshop '99, a Eurographics '99 e 2000.