

ELETTROOTTICA 2002

**7° CONVEGNO NAZIONALE
"STRUMENTAZIONE E METODI DI MISURA ELETTROOTTICI"**

Montecatini Terme, 29 - 31 maggio 2002

Promosso da

Gruppo Specialistico AEI "Fotonica ed Elettro-ottica"

In collaborazione con

SIOF - Società Italiana di Ottica e Fotonica

IEEE-LEOS Italian Chapter

Patrocinato da

Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Comune di Montecatini Terme

In connessione con

**3° WORKSHOP "OTTICHE DIFFRATTIVE , MICROOTTICA
E MICROSISTEMI"**

ATTI

Sessione V 1 – SISTEMI PER DIAGNOSTICA AMBIENTALE		219
Presiede: C.G. Someda , <i>Università di Padova</i>		
V 1.1	<i>Relazione invitata</i> Controllo delle acque di mare con sistemi integrati LIDAR fluorosensore e immagini da satellite	221
	R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni, L. Fiorani, A. Palucci, <i>ENEA</i>	
V 1.2	Sistema mobile DIAL a CO₂ per lo studio dell'evoluzione di una piuma di vapore acqueo	229
	C. Bellecci, P. Gaudio, S. Martellucci, M. Richetta, <i>Università di Roma Tor Vergata</i> T. Lo Feudo, <i>CRATI</i>	
V 1.3	Sviluppo di un sistema per la misura di alte umidità basato su un sensore a punto di rugiada	233
	A.M. Losacco, V. Lombardo, <i>Centro Laser</i> A. D'Orazio, R. Garofalo, <i>Politecnico di Bari</i>	
V 1.4	Integrazione di due Payloads Lidar fluorosensore in piattaforme sottomarina-ROV e volante autonoma-UAV	237
	R. Barbini, F. Colao, D. Ferrante, L. Fiorani, A. Palucci, <i>ENEA C.R.</i>	
V 1.5	Un sensore Lidar con risoluzione spettrale e temporale per il controllo dell'ambiente marino	241
	B. Breschi, D. Novelli, <i>IDEA-ISE</i> M. Bazzani, G. Cecchi, C. Cucci, D. Lognoli, I. Mochi, L. Pantani, V. Raimondi D. Tirelli, M. Trambusti, G. Valmori, <i>IROE-CNR</i>	
V 1.6	Rivelazione fotoacustica laser di tracce di etilene in gas biogeni	245
	G. Giubileo, L. De Dominicis, <i>ENEA Fisica Applicata</i> A. Congiu Castellano, S. Gaudenzi, M. Francucci, <i>Università di Roma La Sapienza</i>	
V 1.7	Sistema spettroscopico integrato per la caratterizzazione di polveri e specie chimiche presenti nelle emissioni di impianti industriali	249
	C. Mariottini, F. Trespidi, U. Perini, <i>CESI</i>	
V 1.8	Analisi dei sedimenti marini con tecnica LIBS campionati durante la XVI campagna oceanografica in Antartide	253
	R. Barbini, F. Colao, R. Fantoni, V. Lazic, A. Palucci, <i>ENEA</i>	
V 1.9	Assorbimento transiente come metodo ottico per la determinazione degli erbicidi	257
	F. Baldini, <i>IROE-CNR</i> C. Domenici, A. Giannetti "Centro Piaggio", <i>Univ. di Pisa & Istituto di Fisiologia Clinica, CNR</i> A.A. Mencaglia, <i>Prodotec</i> , D. Masci, <i>ENEA</i>	
Sessione V 2 - ELABORAZIONE OTTICA		261
Presiede: M. Varasi , <i>AMS</i>		
V 2.1	<i>Relazione invitata</i> Il rilievo 3D di forme complesse: stato dell'arte, applicazioni e prospettive	263
	F. Docchio, A. Patrioli, G. Sansoni, <i>Università di Brescia</i>	

IL RILIEVO 3D DI FORME COMPLESSE: STATO DELL'ARTE, APPLICAZIONI E PROSPETTIVE

Giovanna Sansoni, Franco Docchio, Alessandro Patrioli,
Laboratorio di Optoelettronica, Dipartimento di Elettronica per l'Automazione,
Università degli Studi di Brescia,
via Branze 38, Brescia

In this paper, a review of the state of the art in 3D gauging for design, measurement, virtual reality and cultural heritage applications is presented. The experience made by the Lab of Optoelectronics of the University of Brescia is also detailed.

1 Lo stato dell'arte

Negli ultimi anni si è assistito a un impressionante impulso nello sviluppo di tecniche di visione per misura tridimensionale, tanto che il mercato offre oggi una gamma di digitalizzatori ottici molto vasta. L'obiettivo è ovviamente la misura non a contatto della forma e del colore/tessitura di superfici complesse e a forma libera.

La gamma delle applicazioni che la disponibilità di informazioni 3D rende possibile può essere suddivisa in due grandi categorie [1]. Nella prima il problema è l'identificazione, a partire dai dati misurati, di un oggetto/scena a priori ignoti. E' questo il caso della visione mediante robot: in essa la misura è funzionale all'identificazione degli oggetti appartenenti a una scena, e al riconoscimento della loro posizione al suo interno. Altre applicazioni riconducibili a questa filosofia sono quelle che riguardano la saldatura automatica, la guida automatica di robot, ed applicazioni più generali di visione legate alla robotica.

Le applicazioni che rientrano nella seconda categoria condividono invece l'obiettivo di accuratezza della misura delle superfici. Ne sono un esempio tipico le applicazioni di misura per controllo dimensionale e di qualità dei pezzi prodotti.

Un'area che va rivestendo sempre maggior importanza, soprattutto in un contesto di rapid tooling, è rappresentata dalle applicazioni finalizzate alla riproduzione di oggetti e/o alla generazione di modelli descrittivi che ne consentano la riprogettazione in ambienti CAD. I processi noti come Reverse Engineering, Rapid Prototyping, Collaborative Design fanno tutti capo a questa filosofia. Tutti traggono grande vantaggio dall'utilizzo di sensori 3D ottici nella fase di acquisizione dei dati dimensionali e dipendono fortemente dalla qualità dei dati alla sorgente. L'elaborazione successiva porta alla generazione di modelli diversi: (i) mesh di elementi geometrici semplici (triangoli, ad esempio) quando l'obiettivo sia la riproduzione per lavorazione (sia mediante macchine di prototipoazione rapida, che mediante processi CAM), (ii) modelli CAD delle superfici che hanno una loro parametrizzazione a seconda dell'ambiente di modellazione CAD considerato, (iii) rappresentazioni per sezioni selezionabili interattivamente.

L'utilizzo di digitalizzatori ottici 3D si è andato progressivamente diffondendo anche in ambienti tradizionalmente lontani da quelli fin qui considerati. Un esempio è rappresentato dall'acquisizione di oggetti fragili e di grande valore quali opere d'arte e beni archeologici conservati nei musei. L'obiettivo primario è in genere la misurazione per la catalogazione e il controllo del degrado nel tempo di questi oggetti; inoltre, quando dal puro dato dimensionale si passa a una rappresentazione diversa, che utilizzi modelli a triangoli, ad esempio, si aprono le porte a tutta una serie di applicazioni diverse, quali quelle della musealizzazione virtuale dei pezzi e della loro riproduzione, anche a scopo didattico.

Un'altra applicazione è l'acquisizione di dati dimensionali del corpo umano e la generazione dei modelli digitali corrispondenti mediante sistemi 3D ottici specificamente progettati: la forma del corpo è un parametro importante quando si consideri l'ergonomia dell'oggetto da

progettare; le applicazioni del 'realizzato su misura', siano questi elmetti, divise, abiti, costituiscono un'altra area importante.

Un commento a parte merita tutto ciò che globalmente si individua con il termine 'Realtà Virtuale'. Questa tecnologia, nata per applicazioni di simulazione in ambito aerospaziale e militare, ha ampliato enormemente il suo campo di applicazione grazie soprattutto alla riduzione dei costi dei computer e all'innalzamento delle loro prestazioni di calcolo. In tal modo, applicazioni ai video games, alla riproduzione di forme e oggetti per visualizzazione e interazione sono ampiamente utilizzate e ormai entrate nell'utilizzo comune. Tutte queste applicazioni richiedono ovviamente l'acquisizione di dati dimensionali accurati di oggetti e scene presi dalla vita reale. La loro manipolazione utilizza poi modelli pensati per effettuare il rendering delle superfici, aggiungere la tessitura, il colore e ottenere un alto grado di verosimiglianza e interagibilità degli oggetti virtuali.

I processi fin qui considerati, pur applicati a diversi campi, condividono alcuni aspetti.

- Il primo, già evidenziato, è la sorgente dei dati dimensionali, ovvero il digitalizzatore ottico: riconfigurabilità del sistema, robustezza a variazioni di illuminazione ambientale e di riflettività delle superfici, alte prestazioni di misura, rapidità di esecuzione della misura, portabilità del sistema, rapida taratura sono solo alcune dei requisiti indispensabili.
- Il secondo aspetto è la fruibilità di sistemi software adatti al processing delle immagini di range: acquisizione e registrazione multivista, filtraggio, decimazione, ordinamento sono operazioni indispensabili per rendere gestibile la grossa massa di dati che inevitabilmente, e specialmente in presenza di superfici estese e complesse, vengono generati. La letteratura scientifica è molto ricca al riguardo e l'attività di ricerca ha generato un buon numero di prodotti commerciali di alte prestazioni che possono venire integrati nel processo a valle dell'acquisizione [2,3].
- Il terzo aspetto è la compatibilità dei formati utilizzati per gestire le informazioni. L'esempio tipico è rappresentato dal formato STL, nato per la prototipazione rapida, che di fatto costituisce un'affidabile interfaccia di scambio fra ambienti di modellazione CAD e di generazione di mesh di triangoli per riproduzione.

2. L'attività del Laboratorio di Optoelettronica

E' in questo panorama, così complesso e affascinante, che si muove da tempo parte della ricerca sviluppata presso il Laboratorio di Optoelettronica dell'Università degli Studi di Brescia [4-6]. Il know-how sviluppato è stato recentemente sfruttato per mettere a punto uno strumento che aggiunge alle caratteristiche dei prototipi già realizzati, quelle di maneggevolezza, portabilità, rapido assemblaggio e semplice taratura in corrispondenza ad assetti variabili della testa di misura [7]. Lo strumento, mostrato in Figura 1.a è configurabile sulla base delle specifiche di misura ed è robusto rispetto a variazioni di luce e a non uniformità di colore e di tessitura delle superfici. La testa ottica è rapidamente assemblabile su una struttura di supporto mobile, che ne consente l'orientamento nel volume di misura in funzione delle porzioni di superficie da acquisire. La misurazione sfrutta la proiezione di pattern di luce a frange di periodo variabile, secondo la tecnica di proiezione Gray Code-Phase Shift e la successiva acquisizione mediante una telecamera [5]. Esso fornisce nuvole di punti dense, di incertezza nell'ordine del 1/1500 del range di misura. Queste caratteristiche si accompagnano alla possibilità di ottenere, insieme alla forma, anche il colore delle superfici, estendendo in maniera sensibile le possibilità applicative, da quelle tipiche dell'ambiente industriale e di design a quelle di acquisizione di forme per la realtà virtuale, e per la restituzione di pezzi di interesse culturale e archeologico. Il sistema, denominato *3DShape*, è attualmente commercializzato da uno degli *spin-off* del Laboratorio, Open Technologies srl., che ne ha curato l'ingegnerizzazione, rendendo le fasi di setup e di taratura dello strumento molto rapide e di semplice effettuazione.

Oltre che del software di misura, *3DShape* è corredato anche del software che si occupa del trattamento delle nuvole di punti a valle dell'acquisizione. Le fasi di pre-elaborazione



(1.a)



(1.b)

Figura 1: Il digitalizzatore ottico a campo intero sviluppato dal Laboratorio (1.a); Statua della 'Vittoria Alata', conservata presso il Museo di Santa Giulia, in Brescia.

(filtraggio, eliminazione dei punti isolati, decimazione adattativa), e di allineamento multivista possono essere effettuate dal software sviluppato dal Laboratorio (OPLALIGN, [8]). La generazione di modelli a triangoli, di modelli STL e di modelli CAD viene invece eseguita utilizzando due prodotti commerciali di alte prestazioni. Il primo, Polyworks (InnovMetric Software Inc.) è ottimizzato per la generazione di modelli a triangoli e per riproduzione prototipale e virtuale; il secondo, Geomagic 4.1, (Raindrop Geomagic Inc.) è ottimizzato per il calcolo di superfici parametriche (NURBS) a partire da mesh di triangoli, e quindi ben si adatta ad applicazioni di design.

A partire dalla primavera del 2001 la strumentazione descritta è stata applicata utilmente per la realizzazione di modelli in applicazioni anche molto diverse fra loro. Si è scelto in questo articolo di presentarne una, particolarmente significativa, sia per la complessità del problema di misura, sia perché essa ha richiesto l'esecuzione di molti dei processi richiamati al paragrafo precedente, sia perché ha rappresentato il primo esempio di applicazione e di esecuzione delle misure in ambienti esterni a quello del Laboratorio universitario. Si tratta del rilievo ottico della statua mostrata in Figura 1.b, la 'Vittoria Alata' di Brescia, conservata presso il Museo di Santa Giulia, in Brescia.

3. Applicazione della tecnologia 3D al rilievo della 'Vittoria Alata' di Brescia

La motivazione iniziale dell'attività è scaturita dall'interesse che si è recentemente sviluppato attorno ad ipotesi diverse da quelle comunemente consolidate sull'origine della statua [9]. Esso ha portato la Direzione Musei di Brescia a richiedere l'esecuzione di un set di misure sufficientemente affidabile e completo da permettere agli specialisti del settore di studiarla, svincolandosi dai limiti che comunemente si accompagnano al processo di misurazione tradizionale. Il primo obiettivo del lavoro è coinciso pertanto con l'ottenimento, mediante tecniche non a contatto, delle misurazioni funzionali allo studio delle dimensioni e delle proporzioni dell'opera [10].

3.1 La fase di acquisizione

L'acquisizione è stata eseguita utilizzando il digitalizzatore 3DShape, mostrato anch'esso in Figura 1.b, durante la misura di una parte della superficie (vista). La statua presenta

colorazione molto varia, una morfologia molto complessa e dimensioni ragguardevoli, sia in altezza (2 m) che per la presenza delle ali. In figura sono visibili anche le frange proiettate da 3DShape durante una fase di misura. Ad ogni vista corrisponde un'immagine di range, o nuvola di punti: la Figura 2.a mostra, a titolo di esempio, l'immagine acquisita in corrispondenza a uno dei pattern: esso viene deformato dalla superficie su cui è proiettato, e tale deformazione è l'informazione che consente di risalire alla forma della superficie [7]. Il risultato è la nuvola di punti mostrata in Figura 2.b: la risoluzione di misura è pari a 0.1 mm, la spaziatura laterale dei punti acquisiti è nell'ordine di 0.2 mm, l'ampiezza della vista corrispondente è pari a 160 mm x 120 mm. La figura evidenzia come il sensore acquisisca anche l'informazione di colore oltre a quella di forma. I tasselli di colore più chiaro sono i marker utilizzati per l'identificazione univoca ed accurata dei punti fiduciali fra i quali eseguire le misurazioni sui modelli finali. Essi sono stati applicati secondo densità variabili, 'addensandoli' in corrispondenza alla testa e sulla parti scoperte e 'diradandoli' sulle pieghe dell'abito e sulle ali.

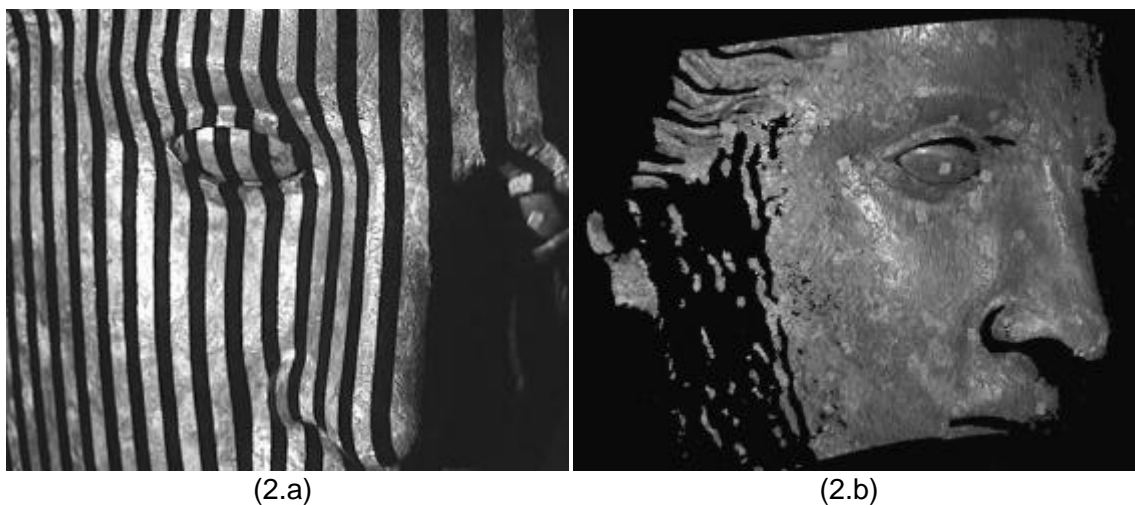


Figura 2: Deformazione indotta dalla superficie sul pattern di luce proiettato (2.a) e nuvola di punti corrispondente (2.b). L'ambiente di visualizzazione è OPL ALIGN.

3.2 La fase di allineamento

Il rilievo completo dell'opera ha richiesto naturalmente la ripresa di moltissime viste, e il loro allineamento in un sistema di riferimento comune. Il criterio fondamentale è stato quello di trovare un compromesso accettabile fra il numero di viste e il loro grado di dettaglio, sia per contenere il tempo richiesto per effettuare l'intero processo, sia per rendere minimo il contributo degli errori legati alla fase di allineamento delle viste. Era inoltre una precisa richiesta da parte degli studiosi dell'opera il poter ottenere una rappresentazione molto dettagliata della testa della statua, che costituisce la fonte primaria di informazioni per lo studio delle sue proporzioni e del canone da cui è stata originata. La notevole altezza e la presenza delle ali hanno pertanto suggerito di diversificare la risoluzione di misura, prevedendo l'acquisizione di nuvole di punti di dimensioni pari a $(160 \times 123) \text{mm}^2$ in corrispondenza alla testa, e di dimensioni pari a $(300 \times 232) \text{mm}^2$ in corrispondenza alle ali e al resto della statua.

Si è scelta anche una logica di acquisizione 'ibrida', che portasse in una prima fase all'ottenimento di poche viste a bassa risoluzione, per minimizzare il contributo di errore legato al processo di allineamento. A tal fine si è utilizzato un campo inquadrato molto ampio, pari a $(450 \times 348) \text{mm}^2$ che ha consentito la definizione dello 'scheletro' del modello. In una seconda fase si è proceduto all'acquisizione di numerose viste molto dettagliate che sono state allineate l'una rispetto all'altra 'appoggiandole' sullo scheletro iniziale, che è poi stato eliminato. La Figura 3 mostra il risultato dell'acquisizione e dell'allineamento di 480 nuvole di

punti, evidenziate ciascuna in colore diverso, a valle dell'allineamento. Il pacchetto software utilizzato è stato il modulo ImAlign del software Polyworks.



Figura 3: Nuvola di punti completa della statua (480 viste).

I dati di misura in corrispondenza alla testa mostrano le caratteristiche metrologiche già commentate per la singola nuvola di Figura 2.b. La parte restante del modello presenta densità di punti variabili fra 0.4mm e 0.6mm e risoluzioni di misura comprese fra 0.11mm e 0.3mm.

3.3 La generazione dei modelli a triangoli

Nella fase successiva le nuvole di punti sono state fuse insieme per la creazione dei modelli a triangoli, che sono stati generati secondo diversi gradi di dettaglio, in funzione dell'utilizzo. La Figura 4 mostra ad esempio il modello a triangoli ottenuto per la testa della statua quando si consideri un punto di misura ogni 0.5mm. In Figura 5 viene presentato un dettaglio del viso quando si conservino tutti i dati nelle nuvole di punti alla massima risoluzione. Questo è anche il modello utilizzato per lo studio del canone della statua. Infatti la rappresentazione informatica consente la selezione a video dei punti fiduciali per la misura, e la conoscenza del dato

dimensionale fornisce automaticamente le distanze. L'alto grado di dettaglio permette di selezionare con grande precisione il centro dei marker, fornendo misure molto affidabili. Si noti anche come il modello ben si appoggi alla superficie, lasciando un gran numero di piccoli triangoli laddove si presentino variazioni della curvatura locale ed invece generando una maglia più lasca in corrispondenza alle zone che si presentano più lisce. In tal modo sia è possibile rappresentare fedelmente parti molto complesse, come i dettagli dell'acconciatura, sia fornire uno strumento di valutazione quantitativa dello stato di conservazione della statua. A tal proposito, si notino le imperfezioni della superficie nella zona oculare, di ampiezza non superiore a 0.1mm, legate ad effetti di corrosione del materiale.

Analogamente alla testa, sono stati creati numerosi modelli a triangoli completi della statua, caratterizzati ciascuno da diversi gradi di dettaglio. Il modello a dettaglio massimo richiede un'occupazione di 63 Mbyte, ed è mostrato in Figura 6 (vista frontale) e in Figura 7 (vista posteriore). Vale la pena sottolineare come, a seconda del grado di fedeltà del modello questo si possa utilmente sfruttare per applicazioni di visualizzazione e di musealizzazione virtuale oltre che per effettuare lo studio dell'opera e documentarne lo stato di conservazione.

3.4 I modelli STL per la riproduzione

La disponibilità di modelli a triangoli ha di fatto aperto le porte ad una serie di applicazioni diverse da quella originaria. Primo fra tutti, è stato verificato il processo di riproduzione, a partire dalla sua mesh a triangoli più dettagliata. L'obbiettivo ha richiesto un fine lavoro di editing, per garantire la 'chiusura' del modello, requisito indispensabile quando si voglia generare un formato STL da utilizzare come ingresso ad una macchina di prototipazione rapida. Il modulo *ImEdit* di Polyworks è stato utilizzato a tale scopo. Si è poi operata una riduzione in scala, e del modello si è selezionata la sola parte relativa alla testa. L'ambiente di lavoro consente di aggiungere alla superficie delimitata dai triangoli uno spessore, facilmente apprezzabile in Figura 8. Questa rappresentazione, in formato STL è stata utilizzata per realizzare la copia della testa, presentata in Figura 9.

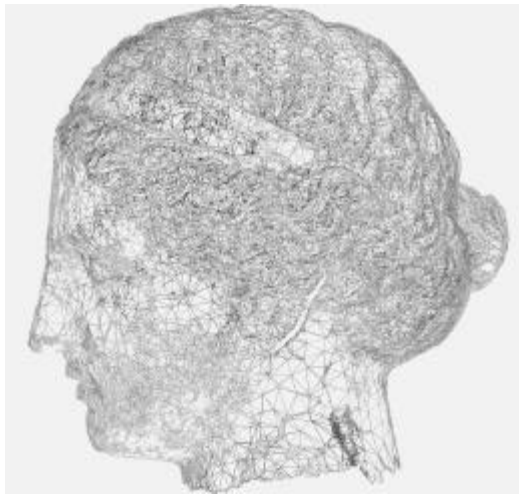


Figura 4: Modello a triangoli della testa generato considerando una distanza media fra i punti di misura pari a 0.5mm.

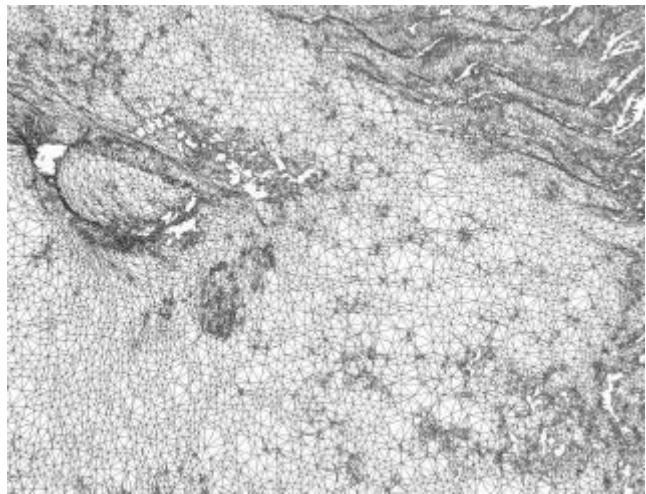


Figura 5: Particolare del modello a triangoli della testa ad alto grado di dettaglio. Le nuvole di punti da cui il modello è generato sono alla massima risoluzione.

3.5 I modelli IGS per il CAD

La generazione delle superfici matematiche utilizzabili in ambiente CAD costituisce un punto molto delicato quando si abbia a che fare con oggetti complessi, specialmente nelle fasi di revisione del design di un prototipo in fase di definizione. Il principale problema, oltre alla necessità di un operatore CAD molto esperto, è il tempo, normalmente lungo, richiesto in questa fase. La scelta del Laboratorio è stata in questo caso di affidarsi all'ambiente Geomagic 4.1, che presenta oltre a una totale compatibilità con i dati di misura di 3DShape e i modelli STL generati precedentemente, anche un potente sistema di calcolo automatico delle superfici parametriche (NURBS) che meglio approssimano la topologia della mesh di triangoli sulla quale 'si appoggiano'. Un esempio è osservabile in Figura 10, che presenta il modello CAD corrispondente al file STL utilizzato per realizzare la copia di Figura 8. Le prestazioni sono molto buone: il 95% degli scostamenti fra le superfici e il modello a triangoli di partenza è contenuto nell'intervallo compreso fra -0.14mm e 0.13mm. Vale la pena sottolineare come il modello ottenuto sia stato generato in modo completamente automatico, e come il sistema dia all'operatore numerosi strumenti per ottimizzarlo, in base alla sua esperienza.



Figura 6: Modello a triangoli della statua a grado di dettaglio massimo (vista frontale).



Figura 7: Modello a triangoli della statua a grado di dettaglio massimo (vista posteriore).



Figura 8: Creazione dello spessore sul modello a triangoli 'chiuso' della testa della statua



Figura 9: Riproduzione della testa della 'Vittoria Alata', scala 1:8.

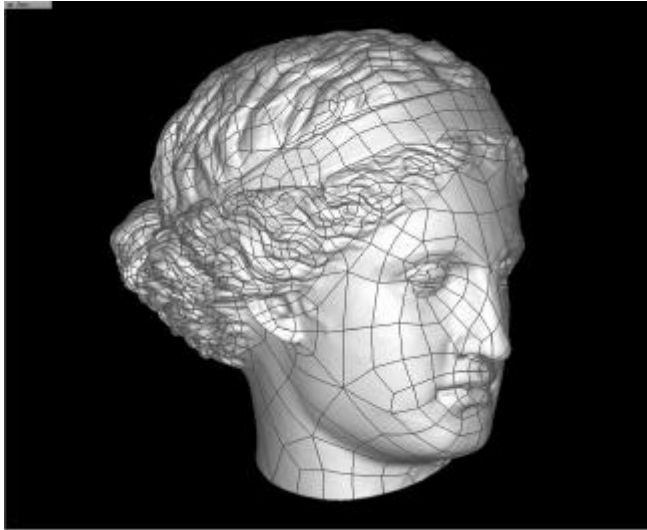


Figura 10: Patch Template utilizzato da Geomagic 4.1 per generare le superfici CAD a partire dal modello a triangoli della testa.

4 Conclusioni

In questo articolo si è voluto dare una panoramica dello stato dell'arte delle applicazioni e dei processi possibili nell'ambito del rilievo ottico tridimensionale. Si è in particolare sottolineato come l'utilizzo di tale sensoristica, opportunamente supportata da ambienti di elaborazione di alta qualità, sia in grado di attuare e rendere efficienti molti processi tipici dell'ambito produttivo, quali quelli di progettazione CAD, prototipazione, controllo e misura. A riprova, si è mostrata un'applicazione, realizzata dal Laboratorio di Optoelettronica dell'Università di Brescia, nella quale tutti i processi su menzionati sono stati attuati, pur essendo finalizzati al rilievo di un'opera d'arte.

5 Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Open Technologies srl per aver messo a disposizione il modello di 10, e i Musei Civici di Brescia, per aver consentito la pubblicazione dei risultati relativi alla 'Vittoria Alata'. Ringraziano infine il Laboratorio di Prototipazione Rapida dell'Università di Udine, per aver realizzato la copia mostrata in Figura 9.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] Domey J.,Burtnyk N., *3D Vision for robotic and automation*, NRC Research Report, 1989.
- [2] <http://Innovmetric.com>
- [3] [http:// geomagic.com](http://geomagic.com)
- [4] V. Carbone, M. Carocci, E. Savio, G. Sansoni, L. De Chiffre, "Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces", *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, pp. 263-271, 2001.
- [5] G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella, "3D vision based on the combination of Gray Code and Phase Shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors", *Appl. Opt.* vol. 38, pp. 6565-6573, 1999.
- [6] G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella, "Calibration and performance evaluation of a 3-D imaging sensor based on the projection of structured light," *IEEE Trans. Instr. Meas.*, n.49, pp. 628-636, 2000.
- [7] Pepi A., Patrioli A., Sansoni G.: *A portable optical digitizer for fast acquisition of free-form surfaces*, In: Proc. of 3D Digital imaging and modeling, Applications of: Heritage, Industry, Medicine & Land, April 2001.
- [8] G. Sansoni, A. Patrioli. "Registration of multiple range views from a portable optical digitizer", *Proc. of ODIMAPII, Optoelectronic Distance Measurements and Applications*, 405-410, Pavia, 2001.
- [9] P. Moreno, *La Vittoria di Brescia*, Archeo, N. 4, Vol. 194, pp. 93-95, 2001.
- [10] G. Marchesini, *Tecniche di rilievo tridimensionale di superfici libere: applicazioni ai beni culturali*, Tesi di laurea, Dicembre 2001.