



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
DIPARTIMENTO DI PROGETTAZIONE E GESTIONE INDUSTRIALE

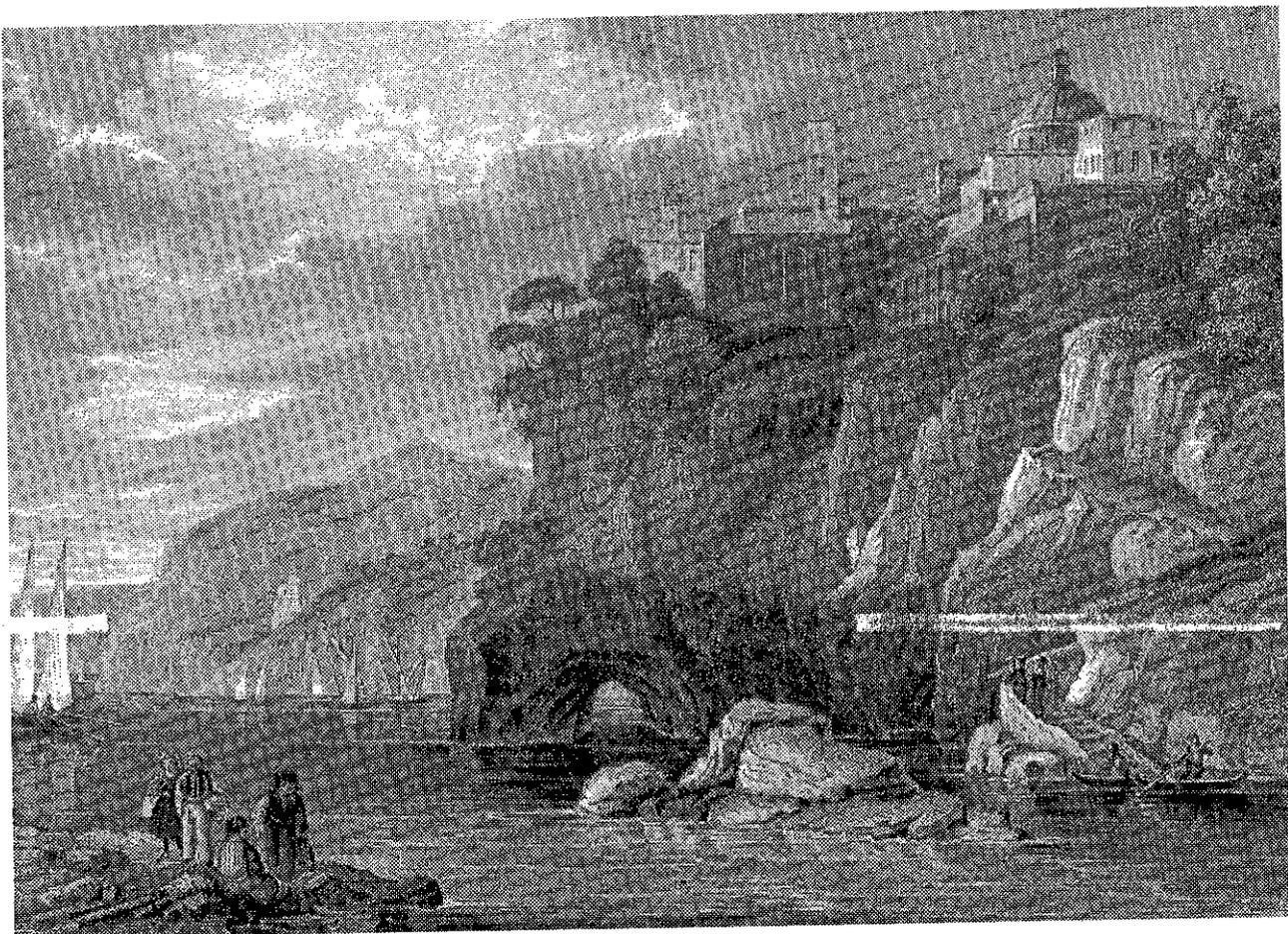


ADM

ASSOCIAZIONE NAZIONALE
DISEGNO DI MACCHINE



Embajada de España
Consejería de Educación
Italia



Il Seminario Italo-Español

**PROGETTAZIONE E FATTIBILITÀ DEI
PRODOTTI INDUSTRIALI**

**DISEÑO Y FABRICABILIDAD
DE LOS PRODUCTOS INDUSTRIALES**

Hotel le Axidie - MARINA DI EQUA

Vico Equense - NAPOLI

24-26 giugno 1998 24-26 de junio de 1998

TARATURA DI UN SISTEMA DI MISURA 3D BASATO SULLA TRIANGOLAZIONE DI LUCE STRUTTURATA PER LA PROGETTAZIONE ED IL CONTROLLO DI PEZZI MECCANICI

Filippo Bertolino, Salvatore Mura, Marco Macis

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Cagliari
Piazza D'Armi - 09123 Cagliari
E-mail: bertolin@iris.unica.it

Sommario

I sistemi di misura basati sulla triangolazione di luce strutturata si stanno oggi diffondendo rapidamente in quanto ad una grande velocità in fase di acquisizione associano semplicità, costi molto limitati, precisione sufficiente in molti campi applicativi. In un precedente lavoro [1] è stato presentato un prototipo di scanner 3D basato su questo principio. Nel seguito si presenta una procedura per la taratura automatica del sistema che consente di ottenere misure molto precise. La taratura procede in due passi: il primo consente di determinare i parametri della CCD, il secondo i parametri del proiettore. Un'interfaccia grafica programmata in LabView consente la gestione delle diverse operazioni. In uscita i dati sono raccolti in un file DXF per AutoCad. Si presentano alcuni risultati significativi.

1. PRESENTAZIONE GENERALE

In molte attività industriali (dalla robotica al controllo di qualità, dalle macchine a controllo numerico ai problemi di reverse engineering) è importante misurare esattamente e velocemente la superficie degli oggetti [2-6]. Il controllo delle superfici di oggetti di forma qualunque è molto difficile e normalmente i dispositivi oggi reperibili nel mercato sono stati progettati per soddisfare esigenze molto specifiche. Di conseguenza le imprese hanno spesso sviluppato i propri strumenti di controllo. Le tecniche utilizzate sono numerose e possono essere classificate in base alla velocità di acquisizione, alla precisione, al contatto o meno delle sonde, al vettore energetico utilizzato (luce, ultrasuoni, elettroni, raggi X, etc.), alla dimensione dell'oggetto che può essere misurato, etc. Grazie alle sue enormi potenzialità in termini di rapidità ed ai costi limitati dei componenti necessari, la triangolazione di luce strutturata è oggi utilizzata in molti sistemi di misura. Per ottenere risultati significativi è però essenziale, prima di procedere alle misure, tarare i componenti del sistema [7-9].

2. IL SET-UP

La fig.1 e la fig.2 mostrano la disposizione dei componenti del sistema che si basa sul principio della triangolazione attiva con luce coerente strutturata in cui un piano di luce,

emesso da una sorgente precisamente localizzata, intercetta l'oggetto da misurare [1]. I componenti principali sono un laser He-Ne ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$ e 35 mW di potenza), uno specchietto messo in rapida oscillazione ($\omega = 105 \div 900 \text{ Hz}$) da un galvanometro, una CCD con un sensore di 640×480 pixels, il cui segnale è digitalizzato in 256 livelli di grigio, un motore elettrico passo-passo che fa ruotare la piattaforma su cui poggia l'oggetto da misurare, un PC che controlla tutte le operazioni. Il motore (un Sanyo 103-7 il cui passo elementare è di 1.8°) è comandato da una scheda di potenza che trova alloggiamento, insieme al trasformatore per l'alimentazione, in un rack dedicato; da questi parte un cavo seriale collegato ad una scheda alloggiata in uno slot del PC.

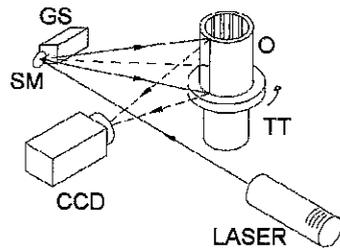


Fig. 1 - Sistema di acquisizione

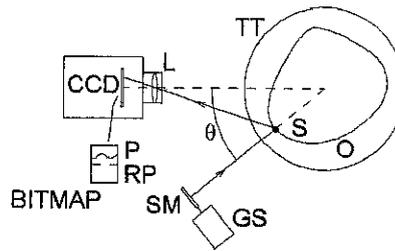


Fig. 2 - Disposizione nel piano

L'angolo di triangolazione θ è formato dalla direzione di illuminazione e da quella di osservazione. Un fascio di luce laser incide sullo specchietto montato sul galvanometro ed illumina la superficie dell'oggetto da misurare. Poichè la frequenza di acquisizione della CCD (25 hz) è inferiore a quella del galvanometro ($105 \div 900 \text{ hz}$), in una singola immagine sono registrate tutte le posizioni illuminate sull'oggetto e visibili secondo l'angolo di triangolazione. Il PC acquisisce 640×480 pixels e salva su disco solo le intensità che superano una soglia predefinita. Questa operazione è molto veloce e consente di ridurre lo spazio occupato sul disco nonchè i tempi di trasferimento dei dati. Se ruotiamo la piattaforma di un angolo α , il sistema è pronto per acquisire un nuovo profilo. Dopo una rotazione complessiva di 360° , disponiamo al massimo di 200 profili ed è possibile ricostruire l'intera superficie. Terminata la fase di acquisizione, il programma di ricostruzione richiama tutti i files precedentemente salvati su disco e da essi estrae i profili dell'oggetto. Questi vengono filtrati per ottenere linee di spessore unitario che vengono poi riproiettate nello spazio ed incollate a formare l'oggetto misurato. Per ottenere buoni risultati è essenziale tarare il sistema di acquisizione ed in particolare conoscere le posizioni relative di CCD, proiettore e piattaforma, nonchè gli angoli di osservazione della CCD e di proiezione del laser rispetto ad un sistema cartesiano di riferimento.

3. PROGRAMMA DI TARATURA

Prima di parlare di parametri geometrici, è necessario localizzare nello spazio i componenti del sistema di acquisizione definendo i relativi riferimenti: la posizione di un punto nello spazio è descritta usando il sistema di coordinate cartesiane $(x, y, z)_{\text{sys}}$. Si localizza un secondo sistema di riferimento $(x, y, z)_{\text{ccd}}$ nel fuoco della CCD in posizione $(x_0, y_0, z_0)_{\text{sys}}$, con l'asse z_{ccd} diretto lungo l'asse ottico. Un terzo sistema di riferimento $(x, y, z)_{\text{sen}}$ giace sul piano del sensore con gli assi $x_{\text{sen}}, y_{\text{sen}}$ allineati con quelli della matrice di pixels e l'asse z_{sen} diretto lungo l'asse

della CCD. Un quarto sistema di riferimento $(x,y,z)_{img}$ ha la stessa orientazione del sistema $(x,y,z)_{sen}$, ma ha l'origine nell'angolo più alto a destra del sensore che corrisponde all'angolo più basso a sinistra nel monitor del computer. Rispetto al sistema $(x,y,z)_{img}$ l'origine del sistema $(x,y,z)_{sen}$ è localizzato nel punto (c_x, c_y) . Per allineare le coordinate dei due primi riferimenti è necessario traslare l'origine del sistema globale in quello locale tramite la matrice [T], ruotare le coordinate del sistema di un angolo γ intorno all'asse z_{sys} , β intorno all'asse y_{sys} e α intorno all'asse x_{sys} , tramite la matrice di rotazione [R], quindi ritrasferire l'origine degli assi nella posizione originale tramite la trasformazione inversa $[T]^{-1}$. Per passare al sistema di coordinate del sensore è necessario a questo punto considerare la trasformazione prospettica [P] che tiene conto della distanza focale f del sistema ottico. Abbiamo quindi le relazioni seguenti:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{Bmatrix}_{sen} = [P] \cdot [T]^{-1} \cdot [R] \cdot [T] \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix}_{sys} = [Q] \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix}_{sys} \quad (1)$$

$$x_{img} = \frac{x_{sen}}{t} + c_x ; \quad y_{img} = \chi \cdot \frac{y_{sen}}{t} + c_y ; \quad \chi = \frac{dy_{pxl}}{dx_{pxl}}$$

in cui dx_{pxl} e dy_{pxl} rappresentano le dimensioni dei pixels della CCD. La taratura procede in due passi: il primo consente di determinare i parametri della CCD, il secondo i parametri del proiettore.

3.1 Taratura della telecamera

I parametri caratteristici della CCD sono la distanza focale f e la dimensione dei pixels. Nelle nostre prove abbiamo utilizzato un obiettivo con $f = 12.5$ mm, ed un sensore con pixels rettangolari di $11 \mu m \times 9 \mu m$. La taratura della CCD consente la determinazione del vettore dei parametri: $p = \{\alpha, \beta, \gamma, x_0, y_0, z_0, c_x, c_y\}$. Si dispone sulla piattaforma un piano verticale su cui è stata disegnata una griglia di dimensioni perfettamente note costituita da 11×11 rette ortogonali. Il sistema di coordinate globale viene disposto sulla griglia, con gli assi x_{sys} ed y_{sys} paralleli alle sue rette e l'asse z_{sys} normale al piano. I punti d'intersezione della griglia forniscono una serie di posizioni di coordinate $\{x, y, 0\}_{sys}$ che sono fondamentali per il processo di calibrazione. Poichè la corrispondenza tra i punti dell'immagine acquisiti dalla CCD ed i punti reali non è biunivoca, sono necessarie delle informazioni addizionali che si ottengono muovendo la griglia in direzione perpendicolare a se stessa di una distanza Δz , che nelle nostre prove abbiamo posto pari a 100 mm. Una volta acquisite le immagini delle due griglie di taratura, queste devono essere binarizzate utilizzando una soglia opportuna. Spesso la scelta non è semplice in quanto soglie troppo basse comportano linee di spessore troppo grosso e/o la comparsa di macchie appartenenti allo sfondo, mentre soglie troppo alte rischiano di cancellare parte delle rette. Si è scelta quindi una via interattiva: il programma propone una soglia di tentativo, ma poi è l'utente che tramite un'interfaccia grafica, sceglie la soluzione più adatta. Nel caso in cui il risultato non fosse soddisfacente è possibile utilizzare diversi filtri per tentare un miglioramento. Una volta binarizzate, le immagini vengono scheletrizzate in modo da produrre rette di spessore unitario. Grazie alla trasformata di Hough è quindi possibile individuare l'equazione delle rette che al meglio interpolano i punti

acquisiti. La mutua intersezione di queste rette fornisce i punti necessari per la calibrazione $(x,y)_{img,i}$. Nella versione attuale, il piano di Hough è costituito da 500x500 accumulatori: ciò garantisce un'ottima precisione, ma una notevole occupazione di memoria (1 MB) e tempi di calcolo non immediati: riteniamo che in futuro si potrà trovare una soluzione ottimale a questo problema.

Tramite l'eq.(1) gli N nodi delle due griglie reali vengono proiettati sulla CCD $(x,y)_{p,i}$ e confrontati con i valori $(x,y)_{img,i}$ acquisiti precedentemente. E' quindi possibile definire la seguente funzione errore:

$$Err = \sum_{i=1}^{2*N} \left[(x_{img,i} - x_{p,i})^2 + (y_{img,i} - y_{p,i})^2 \right] \quad (2)$$

I parametri di calibrazione p_i si ottengono minimizzando la funzione non lineare (2) con il metodo iterativo di Newton-Raphson che consiste nel calcolo del termine di correzione che consente di migliorare la stima iniziale dei parametri. Poichè la convergenza verso la soluzione esatta è garantita solo se l'errore iniziale è sufficientemente piccolo, per rendere più affidabile e precisa la ricerca dei parametri di primo tentativo, è stata realizzata una interfaccia grafica nella quale all'immagine della griglia reale acquisita dalla CCD, si sovrappone quella calcolata utilizzando una matrice di proiezione proposta dall'utente. Quando la sovrapposizione è accettabile viene attivato l'algoritmo di ottimizzazione di Newton-Raphson che si articola nei seguenti passi:

- 1) Calcolo dei punti proiettati $(x,y)_{p,i}$ con l'eq.(1) e stima dell'errore con l'eq.(2);
- 2) Se l'errore è inferiore ad una soglia o se la soluzione diverge, fine dell'algoritmo;
- 3) Calcolo dello jacobiano $\nabla(p_i)$ e della matrice hessiana $[H]$ nel punto p_i (rispettivamente derivata prima e seconda della funzione errore rispetto ai parametri di calibrazione);
- 4) Calcolo del termine di correzione:

$$\Delta p_i = -[H]^{-1}(p_i) \cdot \nabla(p_i); \quad (3)$$

- 5) Calcolo dei nuovi parametri di calibrazione:

$$p_{i+1} = p_i + \Delta p_i; \quad (4)$$

- 6) Vai al passo (1).

3.2 Taratura del proiettore

Per tarare il proiettore si utilizza una diapositiva su cui è stata stampata una griglia costituita da 7x7 rette ortogonali, che viene proiettata sul piano di calibrazione posto nelle due identiche posizioni utilizzate per tarare la CCD.

Con una procedura analoga alla precedente, le due immagini della griglia vengono binarizzate, eventualmente filtrate, scheletrizzate e sottoposte alla trasformata di Hough. Si determinano quindi le equazioni delle rette e le loro mutue intersezioni $(x,y)_{img}$. Grazie ai parametri della CCD già calibrati, questi punti vengono proiettati nel mondo reale per mezzo delle seguenti equazioni:

$$x_{sen} = x_{img} - c_x; \quad y_{sen} = \frac{y_{img} - c_y}{\chi}; \quad \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{Bmatrix}_{sys} = [Q]^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ -f \\ 1 \end{Bmatrix}_{sen} \quad (5)$$

I punti allineati sulle NL rette del primo piano di calibrazione forniscono le seguenti equazioni:

$$x_{sys,ij}^p = m_i \cdot y_{sys,ij}^p + b_i \quad i = 1, 2, \dots, NL \quad (6)$$

in cui $(x, y)_{sys,ij}^p$ indica il j-esimo punto della i-esima retta proiettata sul primo piano di calibrazione. Le equazioni delle NL rette proiettate sul secondo piano di riferimento, traslato di Δz rispetto al precedente, sono invece:

$$x_{sys,ij}^s = m_i \cdot y_{sys,ij}^s + \Delta z \cdot [m_i \cdot \cos(\phi) + \sin(\phi)] \cdot \tan(\phi) + b_i \cdot \left[1 + \frac{\Delta z}{d_p \cdot \cos(\phi)} \right], \quad i = 1, 2, \dots, NL \quad (7)$$

in cui d_p è la distanza tra il centro del proiettore O e l'intersezione dell'asse ottico del proiettore con il piano di riferimento P, ϕ è l'angolo compreso tra l'asse z_{sys} e la retta OP, ϕ è l'angolo tra la proiezione della retta OP sul piano $(yz)_{sys}$ e l'asse y_{sys} . I parametri da determinare sono rispettivamente: α , ϕ , d_p , e le NL coppie di valori m_i , b_i .

Se i parametri fossero perfettamente noti i termini destri delle eq.(6) e (7) sarebbero identici ai termini sinistri; poichè ciò non è vero, è possibile definire la seguente funzione errore:

$$Err_{tot} = Err_p + Err_s$$

in cui

$$Err_p = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_l} [x_{sys,ij}^p - m_i \cdot y_{sys,ij}^p - b_i]^2$$

$$Err_s = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_l} \left[x_{sys,ij}^s - m_i \cdot y_{sys,ij}^s - \Delta z \cdot [m_i \cdot \cos(\phi) + \sin(\phi)] \cdot \tan(\phi) - b_i \cdot \left[1 + \frac{\Delta z}{d_p \cdot \cos(\phi)} \right] \right]^2$$

Anche in questo caso, per minimizzare l'errore si utilizza l'algoritmo di Newton-Raphson. Terminata la taratura, il piano di luce laser viene disposto in modo tale da sovrapporsi perfettamente alla retta verticale centrale della griglia e il proiettore viene spento.

4. RISULTATI E CONCLUSIONI

Per verificare la precisione del sistema si è misurato un cilindro di 50 mm di raggio e 200 mm di altezza. Terminata la ricostruzione, per ogni piano trasversale sono stati calcolati il baricentro, la media e lo scarto quadratico medio dei raggi. L'errore relativo del raggio medio

calcolato su tutta l'altezza del cilindro è inferiore allo 0.1%. Gli scarti sono trascurabili e non sono state individuate differenze apprezzabili tra i raggi calcolati nella parte inferiore del cilindro e in quella superiore. Numerose prove hanno condotto a risultati analoghi.

Le Fig. 3÷6 rappresentano alcuni esempi di oggetti ricostruiti: sono evidenti alcuni difetti dovuti o alla qualità delle superfici (troppo scure o troppo riflettenti) o alla presenza di ombre (non tutto il profilo è illuminato dal piano di luce laser oppure parti del profilo non sono visibili dalla CCD).

Nella versione attuale la distanza focale dell'obiettivo non è sottoposta a taratura, ma in futuro pensiamo di aggiungere questa possibilità perchè quando sulla piattaforma si alternano oggetti di diverse dimensioni è consigliabile l'uso di un obiettivo a fuoco variabile (zoom), che consente di non modificare tutto il set-up e di sfruttare al meglio la CCD, il che comporta una maggiore precisione delle misure.



Fig.3 - Cilindro di taratura

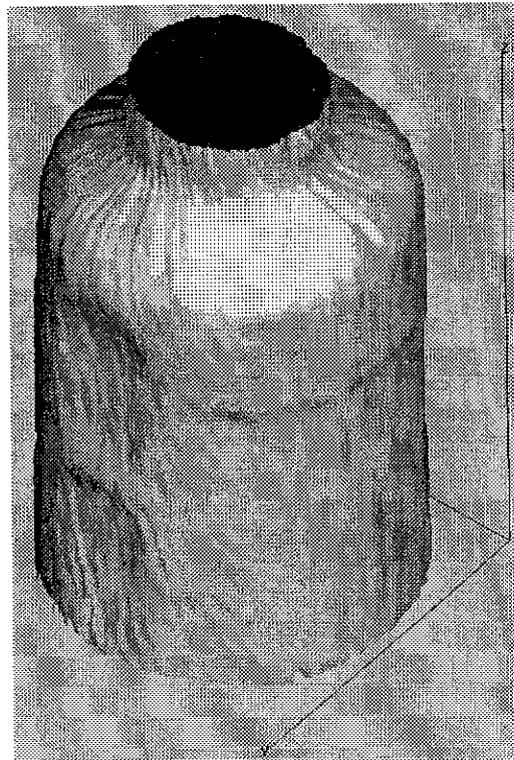


Fig.4 - Bottiglia da ciclista

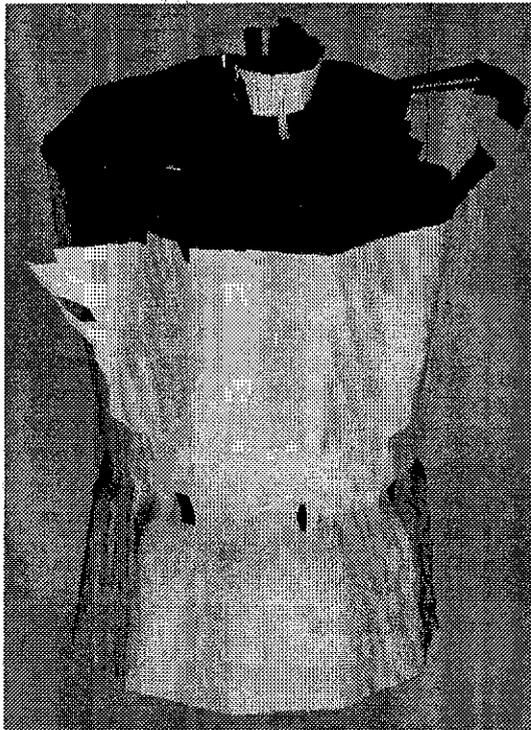


Fig.5 - Caffettiera

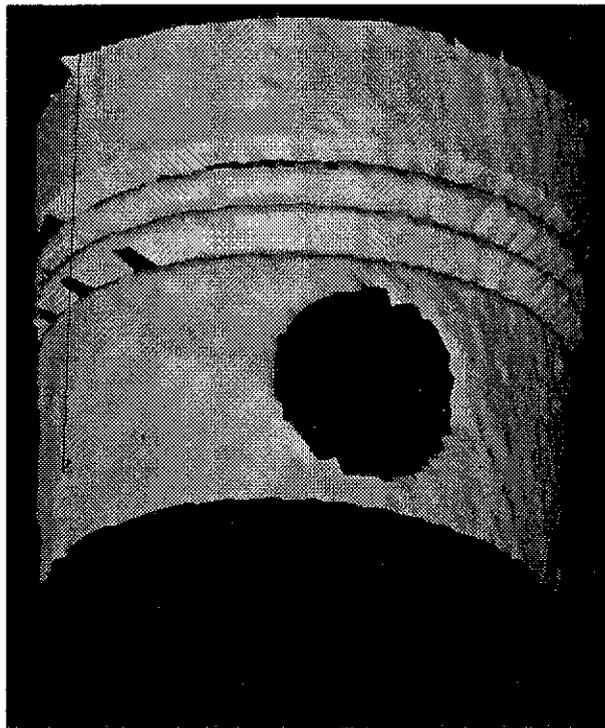


Fig.6 - Pistone

BIBLIOGRAFIA

- [1] F.Bertolino, F.Ginesu, A.Gabba, "Automatic Surface Reconstruction of Simple Mechanical Objects by Triangulation of Structured Light", pp.367-376, Proc.10th ADM Int. Conf., Florence, (1997).
- [2] P.Cielo, "Optical techniques for industrial inspection", Academic Press (1988).
- [3] H.J.Tiziani, "Optical Techniques for Shape Measurements", in Fringe'93 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, Brema 1993,Ed. W.Juptner e W.Osten, Akademie Verlag
- [4] T.S.Newman, A.K.Jain, "A Survey of Automated Visual Inspection", Computer Vision and Image Understanding, Vol.61, No.2, pp.231-262, 1995.
- [5] A.K.Asundi, C.S.Chan, M.R.Sajan, "360-deg profilometry: new techniques for display and acquisition", Opt. Eng. **33**(8), 2760-2769 (1994).
- [6] Wen-Chih Tai, Ming Chang, "Noncontact profilometric measurement of large-form part.", Opt. Eng., **35**(9), 2730-2735 (1996).
- [7] D.W.Manthey, K.N.Knapp II, Daeyong Lee, "Calibration of a laser range-finding coordinate-measuring machine", Opt. Eng. **33**(10), 3372-3380 (1994).
- [8] D.Zou, S.Ye, C.Wang, "Structured-lighting surface sensor and its calibration", Opt.Eng. **34**(10), 3040-3043 (1995).
- [9] S.R.McNeil, M.A.Sutton, Z.Miao, J.Ma, "Measurement of Surface Profile Using Digital Image Correlation", Experimental Mechanics, Vol.37, No.1, ,pp.13-20, March 1997.