

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe: 0208

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In Meccanica Razionale

METODOLOGIE DI ANALISI COMPARATIVA DELLE PRESTAZIONI DI
DISPOSITIVI A CONTATTO PER IL RILIEVO DELLA FORMA

CANDIDATO
Raffaele Micera

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Leonardo Seccia

CORRELATRICI
Prof.ssa Ing. Sara Bagassi
Prof.ssa Ing. Francesca Lucchi

Anno Accademico 2011/2012

Sessione II

Indice Generale

Introduzione	1
Capitolo 1 Il rilievo della forma e i suoi metodi	4
1.0 Introduzione.....	4
1.1 I metodi di rilievo della forma.....	4
1.2 Fasi di sviluppo di un modello digitale tramite acquisizione 3D.....	7
Capitolo 2 Il rilievo della forma con i tastatori	16
2.0 Introduzione.....	16
2.1 Il concetto di misura.....	16
2.2 Le macchine di misura a coordinate (CMM).....	17
2.2.1 Le CMM multi-sensore.....	20
2.2.2 Parti fondamentali di cui è costituita una CMM.....	21
2.2.3 Tipologie di misura di una CMM e caratteristiche ideali della struttura.....	24
Capitolo 3 Cyclone e Pix-30: principio fisico, caratteristiche tecniche e prestazionali, modalità di impiego	26
3.0 Introduzione.....	26
3.1 Principi fisici alla base dei sistemi di scansione <i>Cyclone</i> e <i>Picza Pix-30</i>	26
3.1.1 Principio fisico del <i>Cyclone</i>	26
3.1.2 Principio fisico della <i>Picza Pix-30</i>	31
3.2 Caratteristiche tecniche e prestazionali dei due sistemi.....	32
3.2.1 <i>Cyclone</i>	32
3.2.2 <i>Pix-30</i>	34
3.3 Modalità di impiego.....	35
Capitolo 4 Studio delle prestazioni: sfera campione rilevata con entrambe le strumentazioni e analisi dei dati	37
4.0 Introduzione.....	37
4.1 Effetto di alcuni parametri di scansione sul comportamento del	

<i>Cyclone</i>	37
4.1.1 Effetto del passo nominale di scansione sul numero di punti acquisiti.....	37
4.1.2 Effetto della velocità di scansione sull'accuratezza del passo di scansione.....	42
4.1.3 Effetto della velocità di scansione sul numero di punti.....	43
4.2 Rilievo della sfera campione con il <i>Cyclone</i> e analisi statistica.....	45
4.2.1 Accuratezza	46
4.2.2 Rilievo della sfera.....	47
4.2.3 Allineamento della nuvola di punti in <i>Rapidform</i> e <i>shell deviation</i>	50
4.3 Rilievo della sfera campione con la <i>Pix-30</i> e analisi statistica.....	54
4.4 Andamenti risoluzione/tempo relativi alle due strumentazioni...	57
Capitolo 5 Studio di un caso concreto: rilievo di un concio lapideo con i due sistemi e analisi dei risultati	59
5.0 Introduzione.....	59
5.1 Rilievo con il <i>Cyclone</i>	60
5.2 Rilievo con la <i>Pix-30</i>	62
5.3 <i>Shell deviation</i> tra le due nuvole e analisi dei risultati.....	66
Capitolo 6 Conclusioni e prospettive	68
6.0 Alcune considerazioni finali.....	68
Bibliografia	70

Introduzione

Con il termine *Reverse Engineering* (RE) si definisce il processo inverso della progettazione industriale, che consente, partendo da un oggetto reale, di risalire alla sua descrizione matematica attraverso, ad esempio, il rilievo di un insieme di punti sulla superficie dell'oggetto.

Il rilievo della forma è senza dubbio uno dei settori di maggiore attualità nel campo dell'ingegneria industriale e permette una vasta gamma di possibili applicazioni, per esempio il controllo di qualità di prodotti industriali, la creazione di modelli da inserire in ambienti ricostruiti attraverso la realtà virtuale, lo studio di prodotti concorrenti, la ricostruzione o il restauro di manufatti appartenenti al campo dei beni culturali, la preparazione di modelli di parti anatomiche in campo biomedico, e così via.

Questa crescente richiesta di strumenti di digitalizzazione delle forme oggi può essere soddisfatta da numerosi sistemi di acquisizione reperibili sul mercato. Tuttavia, l'elevato numero di ditte che offrono questo genere di prodotti e, soprattutto, la grande varietà di metodologie utilizzate ed in continuo sviluppo, rivelano la necessità di pianificare attentamente le modalità e gli scopi di un rilievo geometrico della forma di un oggetto.

Questa tesi è stata realizzata studiando le prestazioni e il comportamento in condizioni di funzionamento (e quindi in acquisizione punti) di due strumentazioni per l'ingegneria inversa: il *Cyclone* della *Renishaw* e la *Picza Pix-30* della *DG Corporation*. Le motivazioni alla base di questo tipo di lavoro sono state essenzialmente due:

1. Dotare chi andrà ad eseguire operazioni di rilievo su ciascuna delle macchine, di informazioni complementari a quelle fornite dai manuali delle ditte costruttrici, in modo da avere un essenziale bagaglio di dati sperimentali per sfruttare pienamente le caratteristiche di lavoro delle due macchine.
2. Determinare alcune delle principali caratteristiche metrologiche (risoluzione, accuratezza e precisione) relative ad acquisizioni di un oggetto campione di cui si conosce il modello di

superficie.

In Particolare lo studio qui condotto si articola nel modo seguente: nel primo capitolo si passa in rassegna lo stato dell'arte sulle tecniche di rilievo della forma nell'ambito della ingegneria inversa e si descrivono le fasi principali con cui si articola tale processo. Nel paragrafo 1.1 si descrivono i passaggi che portano alla creazione del modello digitale 3D. Nel paragrafo 1.2 si passano in rassegna i principi di funzionamento degli strumenti di rilievo della forma.

Nel secondo capitolo si descrive il rilievo della forma con le macchine di misura a coordinate, e più precisamente si tratta il caso in cui su queste è montato un sistema tastatore. Nel paragrafo 2.1 si definisce il concetto di misura e alcuni termini tipici della metrologia, che saranno utili nel corso del lavoro. Nel paragrafo 2.2 si definiscono le macchine di misura a coordinate, si dà un'idea di come avviene il rilievo della forma con questi strumenti e delle caratteristiche ottimali che deve possedere la macchina per un corretto processo di scansione.

Nel terzo capitolo vengono descritti due strumenti di acquisizione tridimensionali a contatto: il tastatore meccanico *Cyclone* della *Renishaw* e il tastatore piezoelettrico *Picza Pix-30* della *Roland DG Corporation*.

Nel quarto capitolo si valutano in termini numerici le prestazioni delle due strumentazioni. Nel paragrafo 4.1 è stato realizzato uno studio del comportamento del *Cyclone* al variare di alcuni dei principali parametri di scansione. Nelle sezioni 4.2 e 4.3 è stata effettuata l'analisi di due nuvole di punti, catturate con ciascuna delle due macchine, rispetto ad una nuvola di riferimento. Nel paragrafo 4.4 sono riportati i risultati scansioni con diversi valori di risoluzione, in modo da definire degli andamenti risoluzione/tempo per le due macchine.

Nel capitolo 5 sono riportate le scansioni con le due strumentazioni di un concio lapideo di interesse storico, rinvenuto presso il castello di Cusercoli (FC) dove ha sede il laboratorio di archeoingegneria CAILab della Facoltà di Ingegneria (sede di Forlì). Nelle sezioni 5.1 e 5.2 vengono documentate le operazioni di rilievo del concio rispettivamente con il *Cyclone* e con la *Pix-30*.

Nell'ultima sezione 5.3 del capitolo è collocata l'analisi sulla deviazione delle due *shell* realizzata in *Rapidform*.

Infine, nel capitolo 6 sono sintetizzati i principali risultati e sono proposti alcuni sviluppi.

CAPITOLO 1

IL RILIEVO DELLA FORMA

E I SUOI METODI

1.0 Introduzione

In questo primo capitolo si passa in rassegna lo stato dell'arte sulle tecniche di rilievo della forma nell'ambito della ingegneria inversa e si descrivono le fasi principali in cui si articola tale processo. Nel paragrafo 1.1 si descrivono i passaggi che portano alla creazione del modello digitale 3D. Nel paragrafo 1.2 si passano in rassegna i principi di funzionamento degli strumenti di rilievo della forma.

1.1 I metodi di rilievo della forma

Gli strumenti che in genere si impiegano per misurare le dimensioni di un oggetto possono utilizzare diversi principi di funzionamento che comportano o meno un contatto fisico tra l'oggetto da misurare e lo strumento di misura. Una prima grande distinzione può quindi essere elaborata sulla base del tipo di contatto, e precisamente: le strumentazioni "tattili" prevedono un contatto tra il sistema di scansione e l'oggetto da acquisire, tutte le altre sono non tattili e non invasive. Le apparecchiature tattili sono costituite generalmente da un braccio robotizzato e da un "tastatore" che sonda la superficie del pezzo da analizzare, secondo una procedura che fornisce una buona precisione, ma presenta anche numerosi problemi quali, ad esempio, un processo di scansione molto lento. Gli strumenti non tattili possono essere ulteriormente classificati in acustici, magnetici ed ottici([2], pagg. 69-75) in base al fenomeno fisico che utilizzano per la ricostruzione tridimensionale.

In figura 1¹ è riportata una classificazione dei principi su cui si basano tali strumentazioni e si evidenziano in modo particolare i sistemi "tattili" utilizzati.

Gli strumenti acustici si basano su tecniche analoghe al sonar: con esse, conoscendo la velocità del suono e misurando il tempo necessario tra la sua emissione da una sorgente e il suo ritorno dopo essere stato riflesso da un oggetto, si risale alle distanze percorse e quindi alle posizioni dei punti del modello; questo metodo però è piuttosto sensibile al rumore a causa di interferenze acustiche.

Gli strumenti magnetici derivano da quelli utilizzati in campo medico e sono utilizzati per lo studio di oggetti immersi in liquidi (o di corpi "molli").

Esistono poi numerose tipologie di strumenti ottici per la ricostruzione tridimensionale (detti anche "scanner tridimensionali") che si distinguono per la tipologia di sorgente luminosa utilizzata: esistono sistemi laser (con laser puntuale o laser piano), sistemi a frange di Moiré (con proiezione di frange di interferenza) e sistemi a luce strutturata (emessa da comuni proiettori commerciali); un'altra distinzione può essere fatta tra (vedi [4], pagg. 14-15) i sistemi ottici che utilizzano una sorgente luminosa artificiale, cioè diversa dalla luce visibile, che sono chiamati sistemi "ottici attivi", e sistemi che non richiedono alcuna fonte di energia aggiunta ed utilizzano la luce ambiente e sono detti sistemi "ottici passivi". I primi hanno il vantaggio di raggiungere risoluzioni elevate, ma sono più costosi e non sempre applicabili. Gli ultimi sono economici, pongono meno vincoli in acquisizione ma hanno risoluzioni più basse.

I sensori ottici in generale possono acquisire un numero elevato di punti da una superficie con velocità elevata. La possibilità di rilevare i punti senza che ci sia contatto con l'oggetto permette l'acquisizione di superfici flessibili e materiali deformabili.

I principali limiti di questa tecnologia sono la bassa accuratezza e

¹ Tra i sistemi "senza contatto" tutto ciò che non è ottico è acustico e magnetico, per cui la figura 1 può essere vista innanzitutto alla luce di questa prima distinzione.

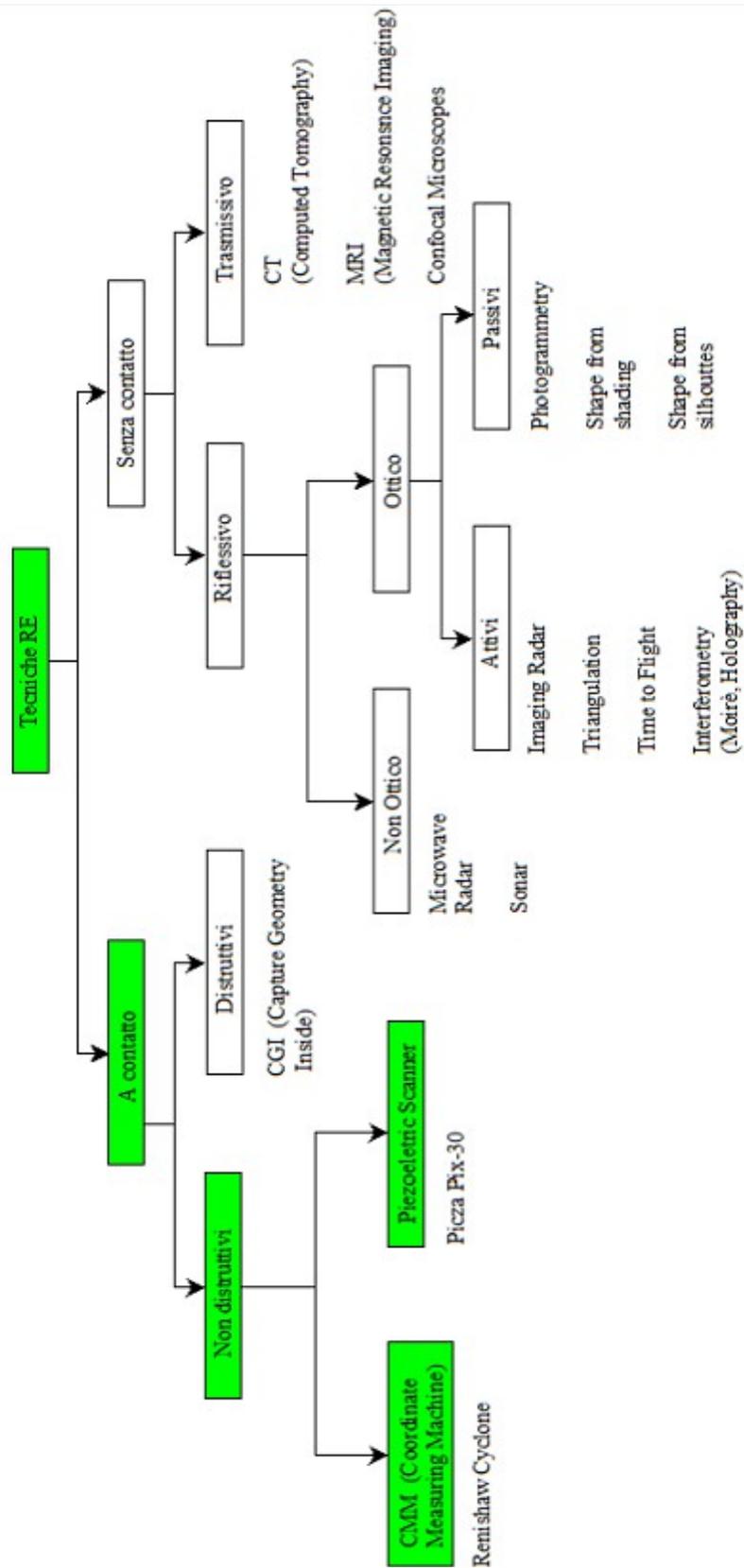


Figura 1 Tecniche di acquisizione (presa da [5], pag. 11)

la sensibilità alle condizioni di riflessività della superficie. I

dati acquisiti attraverso sensori ottici sono spesso affetti da errori ed imperfezioni e possono mostrare ridondanze in alcune aree e punti mancanti in altre.

Tra i "metodi trasmissivi" ([5], pag. 12), citati in figura 1.8, rientra la tomografia computerizzata che utilizza raggi ad alta energia (raggi X) e misura l'energia trasmessa attraverso l'oggetto lungo una serie di sezioni di piccolo spessore. Questo sistema consente, a differenza dei metodi riflessivi, di ottenere una rappresentazione volumetrica ad alta risoluzione della densità dello spazio scansionato, intorno e dentro all'oggetto. I dati volumetrici rilevati possono essere visualizzati direttamente o utilizzati come input per la ricostruzione della superficie dell'oggetto in esame. Inoltre il sistema risulta non sensibile alle proprietà di riflessione superficiale dell'oggetto e permette la rilevazione di eventuali cavità interne.

Nel prossimo capitolo verrà trattato il rilievo della forma con strumenti tattili non distruttivi, anche se prima di concludere questo capitolo mi sembra opportuno dare un'idea di una categoria a parte riconducibile ai metodi tattili, che è quella delle macchine di scansione che operano in modo distruttivo. A questa tipologia afferisce il sistema CGI (*capture geometry inside*), che permette di ricavare delle sezioni sottili da una matrice polimerica in cui si "annega" il pezzo da analizzare, dopo un opportuno indurimento; di questa categoria fa parte anche la tecnica della criotomia utilizzata in campo medico e con la quale sono stati ricavati in passato modelli del corpo umano.

1.2 Fasi di sviluppo di un modello digitale tramite acquisizione 3D

La sequenza di operazioni necessaria per giungere al modello digitale coinvolge l'uso di strumenti software che assistono l'utente durante tutto il processo di trasformazione dei dati provenienti dagli strumenti di acquisizione. Andiamo ora ad illustrare i singoli passaggi del processo ([1], pagg. 195-219):

1. Pianificazione del progetto di presa

Nella fase di progettazione del rilievo bisogna tenere in considerazione gli aspetti materici e geometrici del modello fisico, nonché le sue dimensioni limite che devono essere comprese all'interno del volume di misura dello strumento. Un altro aspetto importante in relazione al principio di funzionamento dello strumento di cattura può risultare il tipo di superficie oggetto dell'acquisizione, e se questa risulta o meno otticamente cooperante, poiché in tal caso l'acquisizione può avvenire senza ricorrere a trattamenti opacizzanti. La scelta del tipo di strumento di acquisizione deve inoltre tenere conto del passo di campionamento (risoluzione) e degli errori sistematici (accuratezza) e aleatori (precisione) che caratterizzano i dati registrati dal sensore. Al termine di questa fase si determinano la posizione e l'orientamento degli strumenti da utilizzare per l'acquisizione dell'intera superficie dell'oggetto, tenendo presente che deve essere garantita una sovrapposizione (vedi figura 2) tra le prese adiacenti del 30-40 % necessaria per un corretta fase successiva di allineamento.

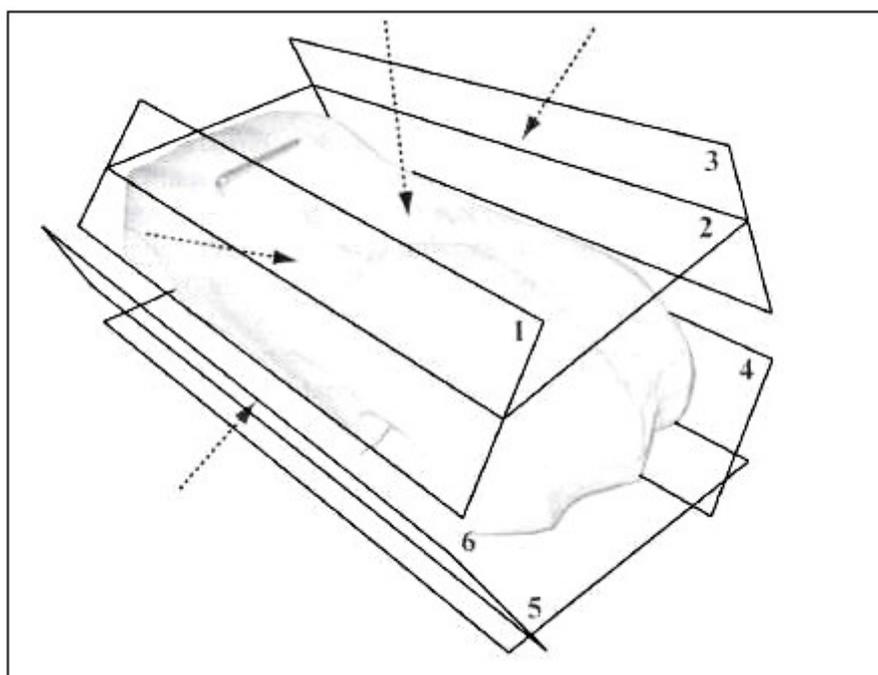


Figura 2 Schema di presa di una maquette di studio dell'Alfa Romeo.
(presa da [1], pag. 201)

2. Acquisizione

La fase di acquisizione è assimilabile a quella di scatto con una fotocamera, con la differenza che catturare un'immagine tridimensionale richiede tempi più lunghi. Nel caso di sistemi che operano realizzando un vero e proprio contatto con il modello, non solo la tipologia di acquisizione risulta differente ma i tempi stessi di cattura risultano i più lunghi.

Terminata l'acquisizione, ciò che si ottiene è, di fatto, una "nuvola" di punti nello spazio 3D; è come se la superficie esterna dell'oggetto reale fosse vista dallo strumento di scansione come costituita da un certo numero (ad esempio 10.000) di punti vicini tra loro. Nella figura 3 si riporta un esempio di nuvola di punti per il piede di una statua acquisito con uno scanner professionale e rielaborato mediante il software *Rapidform* della *Inus Technology Inc.*



Figura 3 Nuvola di punti del piede di una statua (*Rapidform*).
(presa da [2], pag. 74)

3. Filtraggio

Filtrare un dato tridimensionale significa modificare intrinsecamente le informazioni legate ad ogni singolo punto, agendo direttamente sulle coordinate spaziali o sulla informazione cromatica. In via teorica un dato tridimensionale non dovrebbe mai essere filtrato, altrimenti significa che la scelta dello strumento adottato per il

rilievo non è stata coerente con le caratteristiche geometriche e materiche del modello fisico analizzato; d'altro canto nella pratica si dispone solo di un certo numero di strumenti, non di tutti, e raramente caratterizzati da numerosi principi di funzionamento. Nella migliore delle ipotesi si ha quindi la possibilità di scegliere una apparecchiatura che si adatti "abbastanza" alle caratteristiche del modello fisico, garantendo un risultato accettabile ma non sempre ottimale, che spesso deve essere filtrato.

L'azione di filtraggio viene svolta in due "interventi", talvolta complementari:

Il primo caso riguarda una vera e propria eliminazione del dato, passaggio estremamente delicato per la perdita di informazioni che può generare.

Il secondo aspetto riguarda invece la modifica dei dati a seguito di una qualità del dato rilevato non coerente con le caratteristiche della superficie rilevata.

4. Meshing

È il passaggio dalla nube grezza di punti 3D prodotta dal sensore ad un reticolo di poligoni connessi tra loro, i cui vertici coincidono con i punti misurati (*mesh*), vedi figura 4.

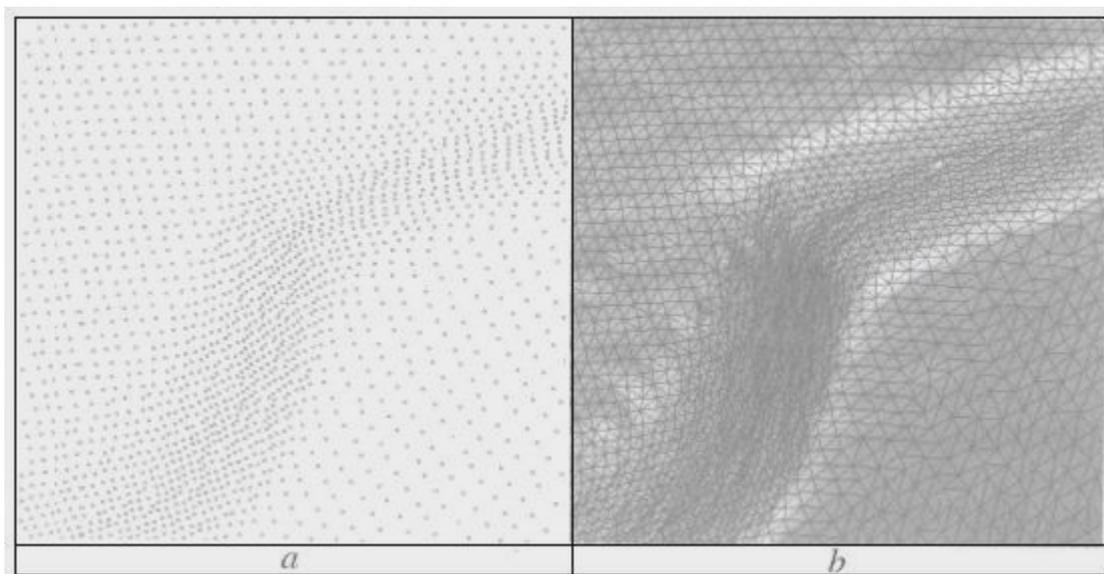


Figura 4 a) insieme di punti risultato dalla cattura; b) superficie poligonale ottenuta da un processo di meshing 3D della superficie.

(presa da [1], pag. 208)

5. Allineamento

Quando tutte le *range map*² necessarie alla descrizione della superficie dell'oggetto sono acquisite con l'opportuna sovrapposizione, inizia la fase di allineamento. Innanzitutto una delle *range map* viene utilizzata come riferimento iniziale, poi se ne sceglie un'altra adiacente e si avvia una procedura semiautomatica, che si avvia scegliendo almeno 3 punti omologhi su ciascuna coppia di prese e che consente di trovare il posizionamento ottimale della seconda ripresa rispetto alla prima; una volta che le prime due sono allineate le si considera come un blocco unico, e si passa all'allineamento della ripresa successiva, fino ad arrivare all'allineamento di tutte le "nuvole".

La matematica su cui si basa questa fase è fatta di procedure iterative che tendono spesso a minimizzare lo scarto quadratico medio (vedi figura 5) non solo tra gli stessi dati di due immagini, ma tra molte; per cui il fatto di disporre, e lavorare poi, su più informazioni dello stesso dato garantisce un dato "risultante" affetto da un errore sensibilmente più basso, seppur a scapito di un dato complessivo più "pesante" e talvolta difficile da gestire.

6. Fusione

Una volta che tutte le immagini sono state allineate vengono "fuse" in un'unica *mesh*. Tutte le informazioni ridondanti vengono scartate e si perde traccia di tutte le riprese originali, alla fine di questa fase si ha un'unica rappresentazione tridimensionale dell'oggetto nel suo complesso. Questa sequenza è totalmente gestita dall'elaboratore, per cui al termine di questa fase di calcolo è necessario controllare che il modello ottenuto abbia conservato le caratteristiche geometriche e morfologiche dell'originale.

2 "Fotografie" tridimensionali dell'oggetto, di cui si ha per ciascun punto almeno 6 informazioni: oltre alle 3 coordinate spaziali se ne aggiungono almeno altre 3, quali informazioni cromatiche R, G, B, di riflessività superficiale e quant'altro la tecnologia di cattura permetta

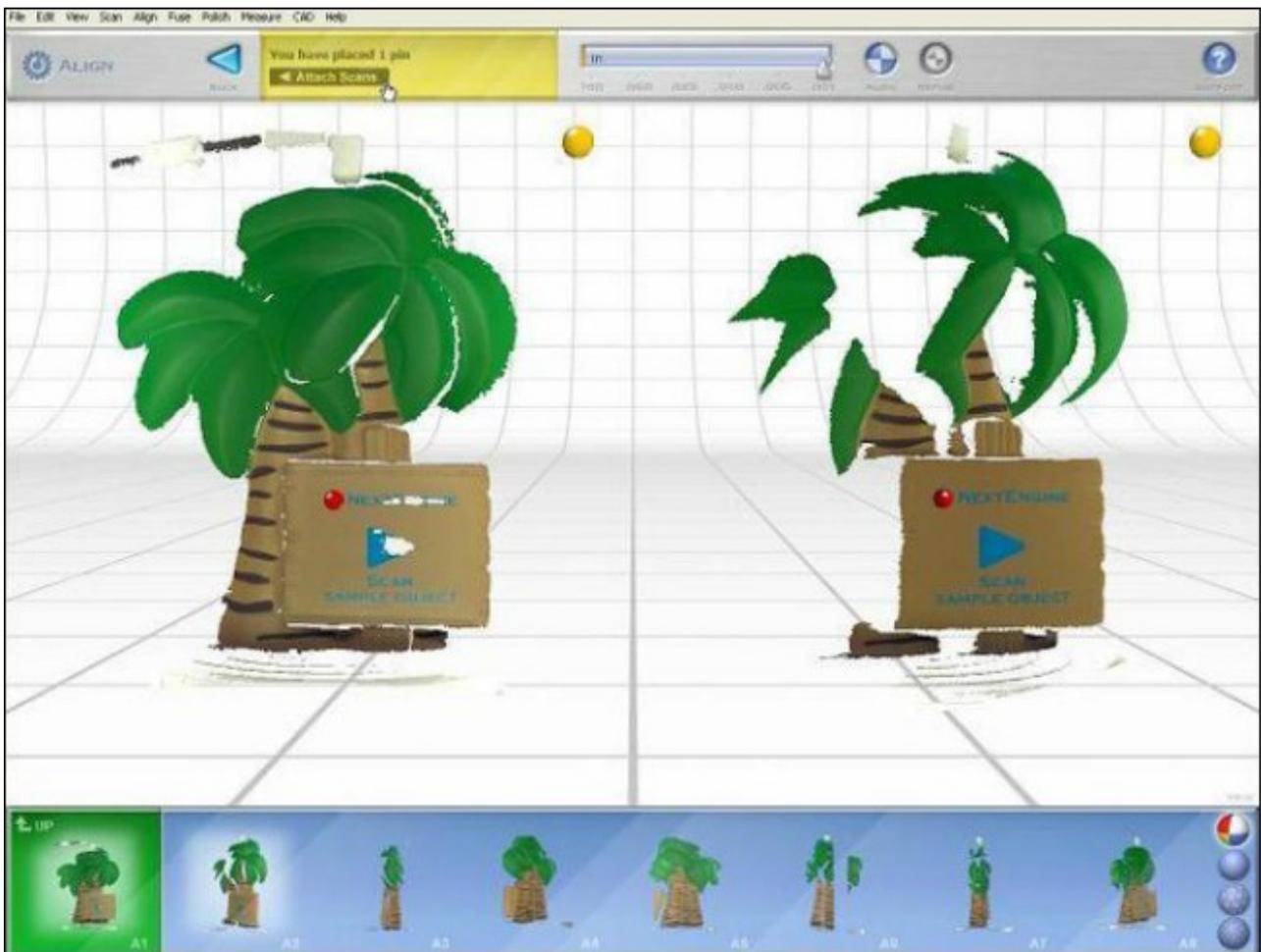


Figura 5 Allineamento ottenuto scegliendo almeno 3 punti omologhi su ciascuna coppia di prese. Le 8 prese sono acquisite con lo scanner tridimensionale a emissione laser della *Next Engine Inc.* ed allineate con il software in dotazione. (presa da [3], pag. 39)

7. Modifica della superficie poligonale

Anche se la fusione si realizza nel migliore dei modi, usualmente rimangono delle carenze nel modello, che sono essenzialmente di tre tipi: errori topologici, lacune e superficie "rumorosa". Di conseguenza prima di passare alla fase successiva è indispensabile migliorare la *mesh*.

³⁵₁₇ **Correzione degli errori topologici:** possono infatti crearsi sporadiche connessioni anomale tra poligoni che non hanno motivo logico di esistere e possono essere immediatamente individuati come errori topologici (figura 6). In tal caso occorre "ripulire" la *mesh* con modalità semiautomatiche

che i diversi software disponibili sul mercato mettono a disposizione.

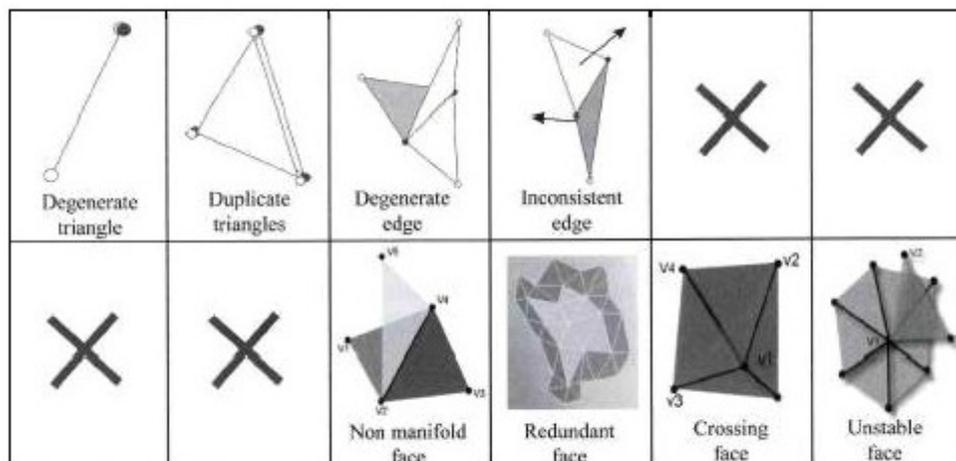


Figura 6 Confronto tra le diverse tipologie di errori topologici rilevate dal software *Polyworks* (prima riga) della *Innovmetric Ltd* e *Rapidform* (seconda riga). Solo due di queste tipologie coincidono, mentre le altre 4 possono essere trovate solo utilizzando l'uno o l'altro software. (presa da [1], pag. 214)

³⁵₁₇ Ricostruzione delle lacune: vengono ricostruite eventuali lacune (in figura 7 è possibile vedere le diverse tipologie di lacune) su piccole aree del modello digitale, tali lacune sono caratteristiche delle acquisizioni con strumenti di tipo ottico; queste possono essere generate da zone d'ombra presenti sull'oggetto in fase di acquisizione o da problemi di riflessione del materiale. La presenza di un forte intervento manuale in questa operazione rende questa fase particolarmente lunga ed onerosa. Va detto, ed è importante, che per ogni tipologia di lacuna la fase di chiusura è tanto più efficace quanto più i bordi delle lacune sono "puliti", ovvero non presentano anomalie topologiche di bordo spesso presenti lungo le lacune.

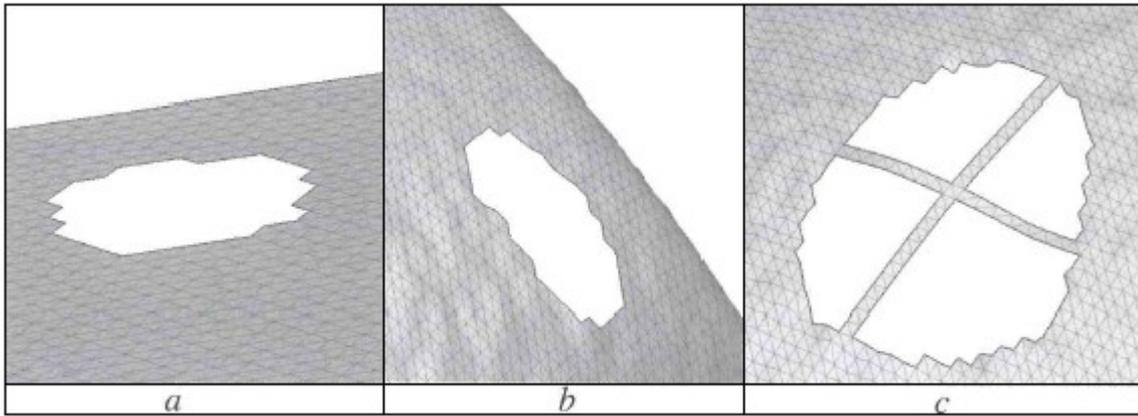


Figura 7 a) lacuna su area piana; b) lacuna su superficie curvilinea; c) lacuna di grandi dimensioni con la costruzione di ponti di collegamento tra un bordo e l'altro, che fanno da supporto nella fase di chiusura. (presa da [1], pag. 215)

³⁵₁₇ Riduzione del "rumore": esistono differenti algoritmi che permettono di rendere più liscia una superficie poligonale, o altresì di ridurne il rumore. Essendo procedure di tipo iterativo, maggiore è il numero di iterazioni maggiore risulterà la lisciatura finale della superficie. Quest'ultimo passaggio rappresenta una delle fasi più delicate del *post-processing* del modello per le sostanziali e importanti modifiche che possono essere apportate alla superficie.

8. Esportazione

Riguarda la conversione dei dati 3D nel formato richiesto dalla particolare applicazione: STL (*solid to layer*) per la prototipazione rapida (RP) e VRML (*virtual reality modelling language*) per la realtà virtuale (VR).

La RP (*rapid prototyping*) è una tecnologia che consente la stampa di oggetti tridimensionali di geometria comunque complessa in tempi e costi molto ridotti. Le parti vengono realizzate per deposizione di sottili strati di materiale, che solidificando all'istante vengono coperti, nelle passate successive, da altre strisce di deposito. La VR (*Virtual Reality*) prevede la visualizzazione del modello digitale in applicazioni multimediali tridimensionali e interattive, può essere definita come un insieme di tecniche in grado di realizzare

percezioni realistiche in mondi creati interamente in maniera digitale.

9. Interpolazione della *mesh* con superfici, tipo NURBS

Esiste la possibilità di determinare delle superfici che approssimano il reticolo poligonale in cui è stata suddivisa l'immagine (figura 8). È la fase più delicata, ma permette di ottenere un modello facilmente modificabile con i moderni sistemi CAD.



Figura 8 Risultato della trasformazione di una nuvola di punti in un oggetto CAD 3D (*Rapidform*). (presa da [2], pag. 74)

CAPITOLO 2

IL RILIEVO DELLA FORMA CON I TASTATORI

2.0 Introduzione

In questo secondo capitolo si descrive il rilievo della forma con le macchine misura coordinate, e più precisamente si tratta il caso in cui su queste è montato un sistema tastatore. Nel paragrafo 2.1 si definisce il concetto di misura e alcuni termini tipici della metrologia, che saranno utili nel corso del lavoro. Nel paragrafo 2.2 si definiscono le macchine misura coordinate, si dà un'idea di come avviene il rilievo della forma con questi strumenti e delle caratteristiche ottimali che deve possedere la macchina per giungere ad un corretto processo di scansione.

2.1 Il concetto di misura

La misura è l'assegnazione di un intervallo di valori ad una particolare proprietà fisica (chiamata anche misurando). L'attività svolta per assegnare una misura si definisce misurazione. Con il termine misurando non ci si riferisce all'oggetto o al fenomeno su cui si sta eseguendo una misurazione, ma ad una specifica grandezza che caratterizza quest'ultimo. Per esempio, quando si rileva la temperatura di un liquido, il misurando non è il liquido, ma la temperatura del medesimo. Per questioni sperimentali e teoriche il misurando non è, in realtà, descrivibile da un solo valore numerico, anche ipotizzando una precisione di misurazione infinita. Ogni misura viene così definita da un intervallo di valori entro cui probabilmente essa è compresa. Lo sviluppo della metrologia ha portato a definire in chiave statistica il valore dei misurandi, e

all'introduzione del concetto di incertezza di misura ([6], capitolo 2). Quest'ultimo è legato al concetto di intervallo, all'interno del quale, con elevata probabilità, si trova il valore vero di una grandezza.

In [1], pag. 126 e [7], sono definiti i termini comunemente utilizzati in metrologia per indicare alcune tra le principali caratteristiche di una misura:

- **Risoluzione (massima):** consiste nella più piccola variazione del misurando che può essere misurata. Nel caso di uno strumento per rilievo tridimensionale tale variazione è definita dal minimo passo di campionamento spaziale utilizzabile.
- **Accuratezza:** rappresenta l'errore tra la misura di una quantità e il suo vero valore (o il valore accettato per vero). È un errore che si sovrappone sistematicamente ai dati rilevati; nel caso di misure ripetute di uno stesso valore si può determinare come la distanza tra la media dei dati misurati e il dato reale.
- **Precisione:** è rappresentata dalla dispersione delle misure intorno alla loro media. Permette di stimare la componente casuale dell'errore: considerando più misure ripetute è valutata dallo scarto quadratico medio tra le singole misure e la loro media.

2.2 Le macchine di misura a coordinate (CMM)

I termini risoluzione, accuratezza e precisione definiscono, allo stesso modo di come qualificano il concetto di misura, le prestazioni delle macchine di scansione.

Esaminando il grafo di figura 1.8 si capisce che le CMM si collocano tra le tecnologie "tattili" per il rilievo della forma.

Anzitutto si definisce strumento di misura un'apparecchiatura con la funzione di effettuare una misurazione. Lo strumento può presentarsi come un singolo oggetto, oppure può essere composto da due o più elementi che, opportunamente combinati, permettono di eseguire la misura, e in questo caso si parla di sistema di misura.

La macchina misura coordinate ([8], pagg. 343-348, figura 1) è uno

strumento che permette di acquisire le coordinate spaziali di punti appartenenti alle superfici di un manufatto. In questo caso uno stilo rigido più o meno lungo, terminato con una piccola sfera di rubino sintetico (vedi figura 2) che agisce da sonda, viene appoggiato sulla superficie di un oggetto e la misura viene effettuata rilevando i suoi punti lungo linee di scansione predefinite. Dai punti si risale all'andamento delle superfici che lo descrivono in uno spazio tridimensionale. Macchine del genere possono arrivare a misurare un dislivello di un micrometro, ovvero di un millesimo di millimetro. Queste macchine possono essere controllate manualmente da un operatore, o per mezzo di un computer. Il sistema di movimentazione di una CMM è tipicamente costituito da tre assi, X, Y e Z, tra loro ortogonali e formanti un sistema di coordinate tridimensionale. Le misure sono definite attraverso il tastatore (*probe*) presente sul terzo asse della macchina. L'applicazione principale di questo strumento di misura è l'ispezione geometrica, ma viene utilizzato anche per ispezioni dimensionali o per identificazioni di geometrie incognite. Esistono diversi settori in cui le CMM sono utilizzate come ad esempio l'industria automobilistica, meccanica, elettronica ed aeronautica e militare.

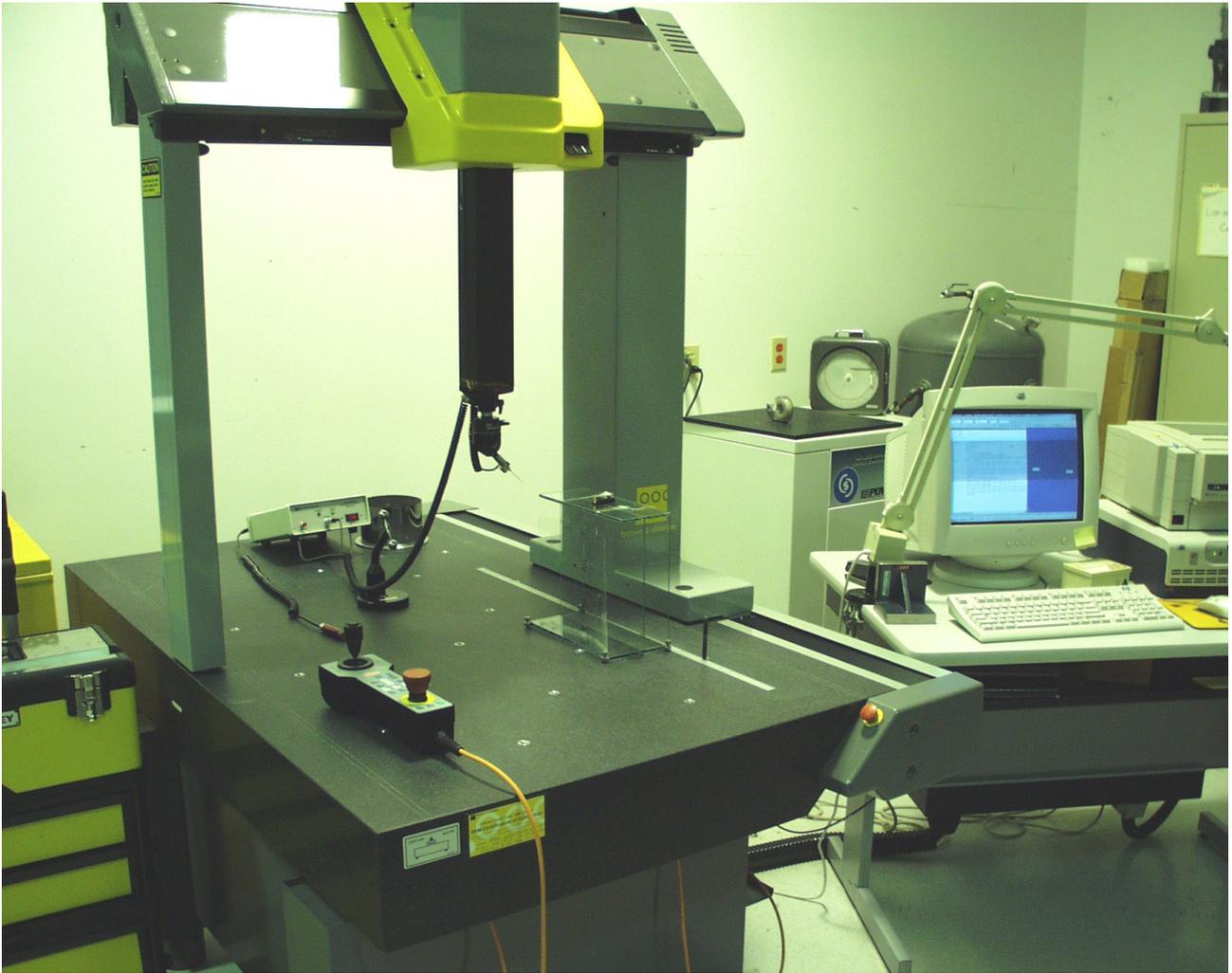


Figura 1 Macchina misura coordinate *Mistral 700* della *Brown and Sharpe*.
(presa da [9])

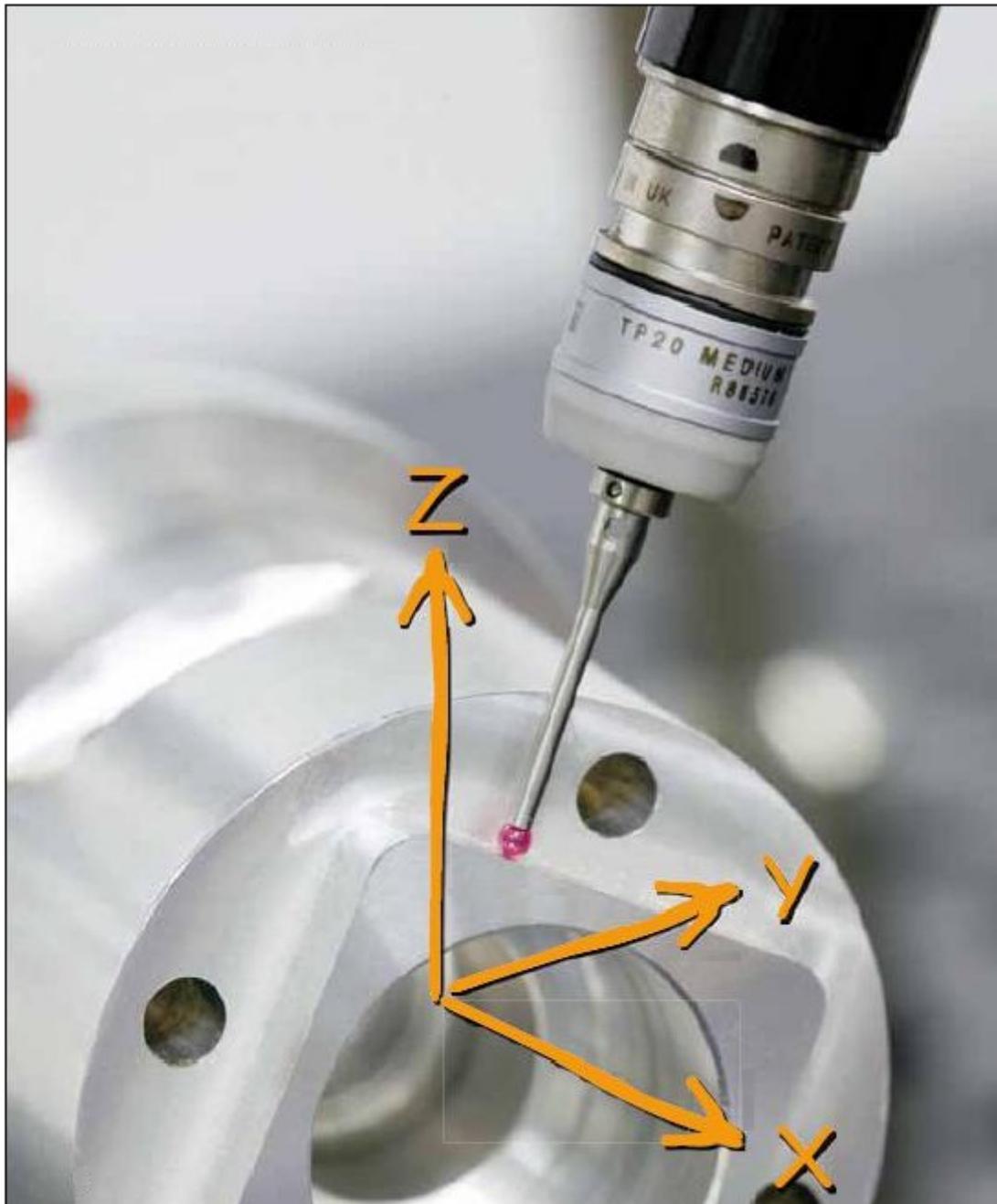


Figura 2 Esempio di stilo della *Renishaw*: la sonda costituisce il punto di contatto tra la CMM e il pezzo di lavoro. (presa da [10], pag. 6)

2.2.1 Le CMM multi-sensore

Il processo più comune per l'acquisizione è a contatto, tramite tastatore, ma esistono anche CMM equipaggiate con strumenti di tipo ottico, o anche di tipo ibrido, cioè macchine multisensore (figura 3) che combinano i vantaggi delle diverse configurazioni: la capacità dei sensori ottici di generare velocemente delle informazioni che

riguardano la totalità della superficie, con quella di ottenere delle informazioni molto accurate tipica dei sensori a contatto.



Figura 3 Esempio di sistema ottico e meccanico integrato.
(presa da [11])

2.2.2 Parti fondamentali di cui è costituita una CMM

Una macchina misura coordinate è tipicamente formata dalle seguenti parti fondamentali ([12], pagg. 78-80):

- ³⁵₁₇ Sistema macchina (struttura meccanica e scale di lettura): serve per supportare i carri, che devono essere liberi di muoversi, con ridottissimi attriti, ciascuno su uno dei tre assi di una terna cartesiana ortogonale. La struttura deve essere dotata di scale di lettura capaci di fornire la posizione di ciascun carro riferita all'asse lungo il quale si muove.

³⁵₁₇ Sistema elettronico per il controllo e l'elaborazione dei dati: è il sistema software associato alla macchina, recepisce le coordinate dei punti letti dalle scale e registra in un proprio archivio relativo al modello le coordinate dei punti "congelati" dal sistema tastatore ed esegue le necessarie compensazioni geometriche e/o termiche, ed eventualmente calcola i parametri richiesti dalla misura.

³⁵₁₇ Sistema tastatore: il sistema tastatore (che verrà chiamato per brevità "tastatore", vedi figura 4) ha lo scopo di generare gli opportuni segnali che abbinati alle letture delle scale consentono di congelare, in un adeguato sistema di riferimento, le coordinate cartesiane del centro dell'elemento tastatore nel momento in cui entra in contatto con la superficie tastata.

È opportuno mettere in evidenza che esistono numerosi tipi di tastatore ([12], pagg. 78-79), i principali sono:

³⁵₁₇ Il tastatore meccanico (solo per CMM manuali): il tastatore meccanico è un elemento rigido e indeformabile, almeno in prima approssimazione, cioè a meno di eventuali correzioni da considerare dovute a flessioni elastiche della sonda durante la misura. Il tastatore deve essere portato a contatto con il pezzo da misurare e quindi deve essere dato al sistema il comando di acquisizione punto (ad esempio con un interruttore a pedale).

³⁵₁₇ Il tastatore *switching* o *touch-trigger*: questo tipo di dispositivo è in grado di "congelare" le letture dei tre sensori di movimento delle guide non appena la punta della sonda viene a contatto con la superficie del componente, il contatto con la superficie provoca una deflessione della sonda che si traduce in una variazione di resistenza elettrica del circuito annesso e quindi in segnale di tensione al software preposto per l'elaborazione.



Figura 4 Moderno sistema tastatore (*Radio Machine Probe 600*) della *Renishaw* ad elevata accuratezza. (presa da [13])

³⁵₁₇ Il tastatore analogico o continuo: fornisce un segnale proporzionale allo spostamento dell'elemento sensibile del tastatore. I tastatori proporzionali possiedono tanti trasduttori di posizione interni quanti sono i gradi di libertà e sono quindi idonei per misurare in modo "continuo" forme anche sconosciute.

2.2.3 Tipologie di misura di una CMM e caratteristiche ideali della struttura

Le tipologie di misura di una CMM dipendono non solo dal tipo di macchina ma, come si può immaginare alla luce della precedente classificazione sui tastatori, anche dal tipo di tastatore montato e sono:

- **Punto-punto:** si rileva un punto alla volta, ed il sensore si stacca dalla superficie dopo ogni rilevazione. Lo svantaggio di questo metodo è che può essere un procedimento molto lento per la rilevazione di ogni punto.
- **Scansione:** il sensore è sempre a contatto con la superficie e la misura avviene in continuo, è una procedura che permette di acquisire i punti in maniera decisamente più veloce rispetto alla modalità precedente.

Attraverso questa tipologia di misura, con un tastatore di tipo analogico, si possono scansionare superfici con geometria incognita.

Per permettere un'ottimale riuscita dell'operazione di acquisizione della nuvola di punti, la struttura meccanica di una CMM, di cui sono nomenclati i principali elementi in figura 5, deve possedere alcune proprietà:

³⁵/₁₇ Rigidezza statica e dinamica della struttura.

³⁵/₁₇ Garantire l'accessibilità a tutte le parti del pezzo attraverso sistemi di bloccaggio che permettano di angolare il modello o attraverso l'uso di sonde orientabili, cioè con angolo dello stilo variabile.

³⁵/₁₇ Facilità di manovra.

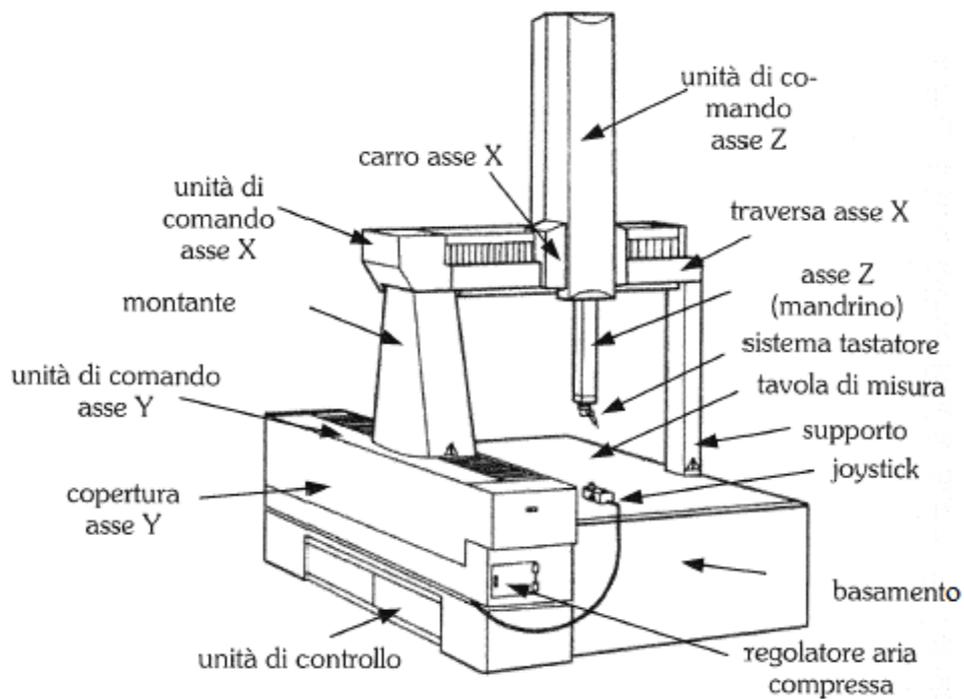


Figura 5 Nomenclatura dei principali elementi di una CMM.
(presa da [14], pag. 7)

Nel prossimo capitolo si parlerà delle CMM scendendo nei dettagli costruttivi del sistema di acquisizione tridimensionale a contatto *Cyclone* della *Renishaw* ed estrinsecando i principi che ne regolano il funzionamento.

CAPITOLO 3

Cyclone e Pix-30: principio fisico, caratteristiche tecniche e prestazionali, modalità di impiego

3.0 Introduzione

In questo terzo capitolo descriveremo due strumenti di acquisizione tridimensionali a contatto: il tastatore meccanico *Cyclone* della *Renishaw* e il tastatore piezoelettrico *Picza Pix-30* della *Roland DG Corporation*.

3.1 Principi fisici alla base dei sistemi di scansione *Cyclone* e *Picza Pix-30*

In questa sezione ci occupiamo di descrivere i principi fisici che permettono di "congelare" le coordinate dei punti attraverso gli elementi di contatto con le superfici appartenenti a ciascuna delle due strumentazioni.

3.1.1 Principio fisico del *Cyclone*

Sonde cinematiche resistive ([15], pag. 2)

Tre perni equidistanti sono posizionati su sei sfere in carburo di tungsteno per fornire sei punti di contatto in una posizione cinematica. I contatti costituiscono un circuito elettrico. Il meccanismo ha una molla pre-caricata che consente la deflessione quando lo stilo della sonda viene a contatto con il pezzo e permette

alla sonda di tornare alla stessa posizione, con una tolleranza di 1-2 μm , se non si verificano contatti (figura 1).

Sotto il carico della molla, vengono create aree di contatto fra la sfera e il perno attraverso le quali passa la corrente elettrica. Al momento del contatto con il pezzo, la forza esercitata sullo stilo allontana le sfere e i perni, riducendo le dimensioni delle aree di contatto e aumentando la loro resistenza elettrica (figura 2). Quando si raggiunge la soglia definita, la sonda genera il segnale.

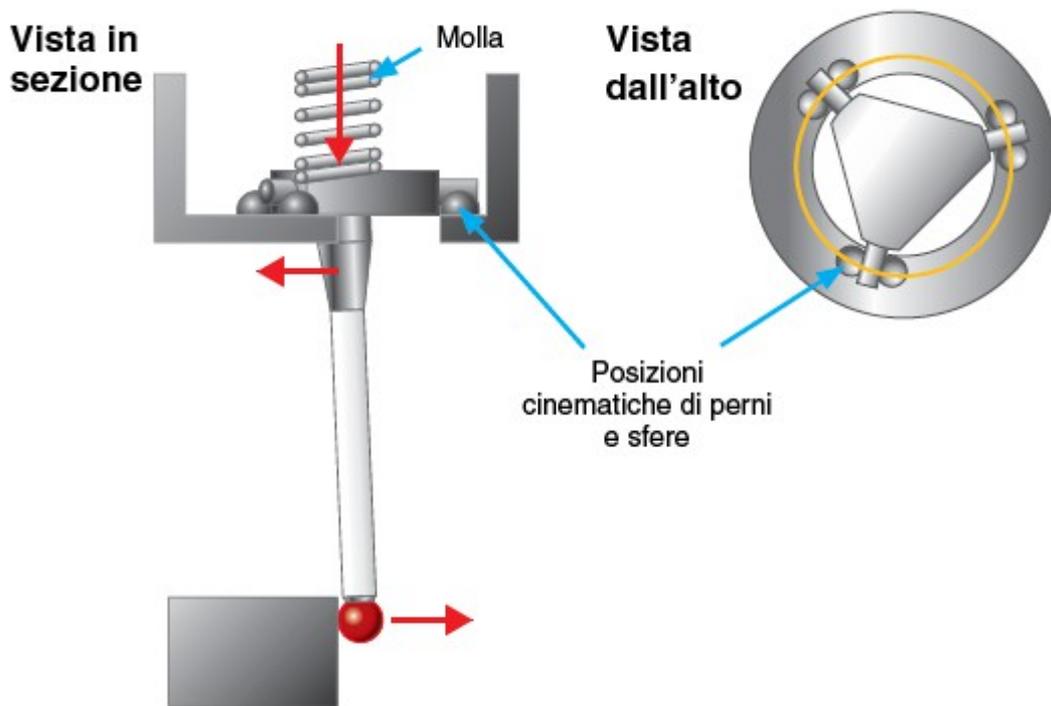


Figura 1 Funzionamento di una sonda cinematica resistiva (presa da [15], pag. 2)

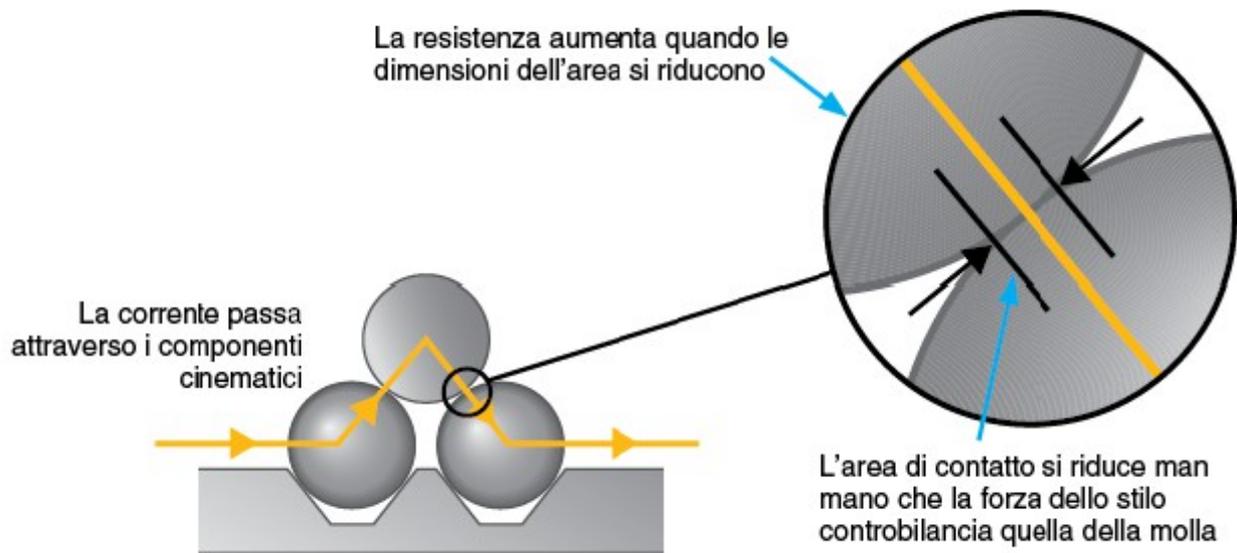


Figura 2 Sezione dei componenti cinematici. (presa da [15], pag. 2)

In figura 3 vengono mostrate le fasi della procedura di acquisizione basata sul principio della resistenza cinematica. La ripetibilità del segnale elettrico e il riposizionamento meccanico del meccanismo sono elementi fondamentali per una metrologia affidabile.

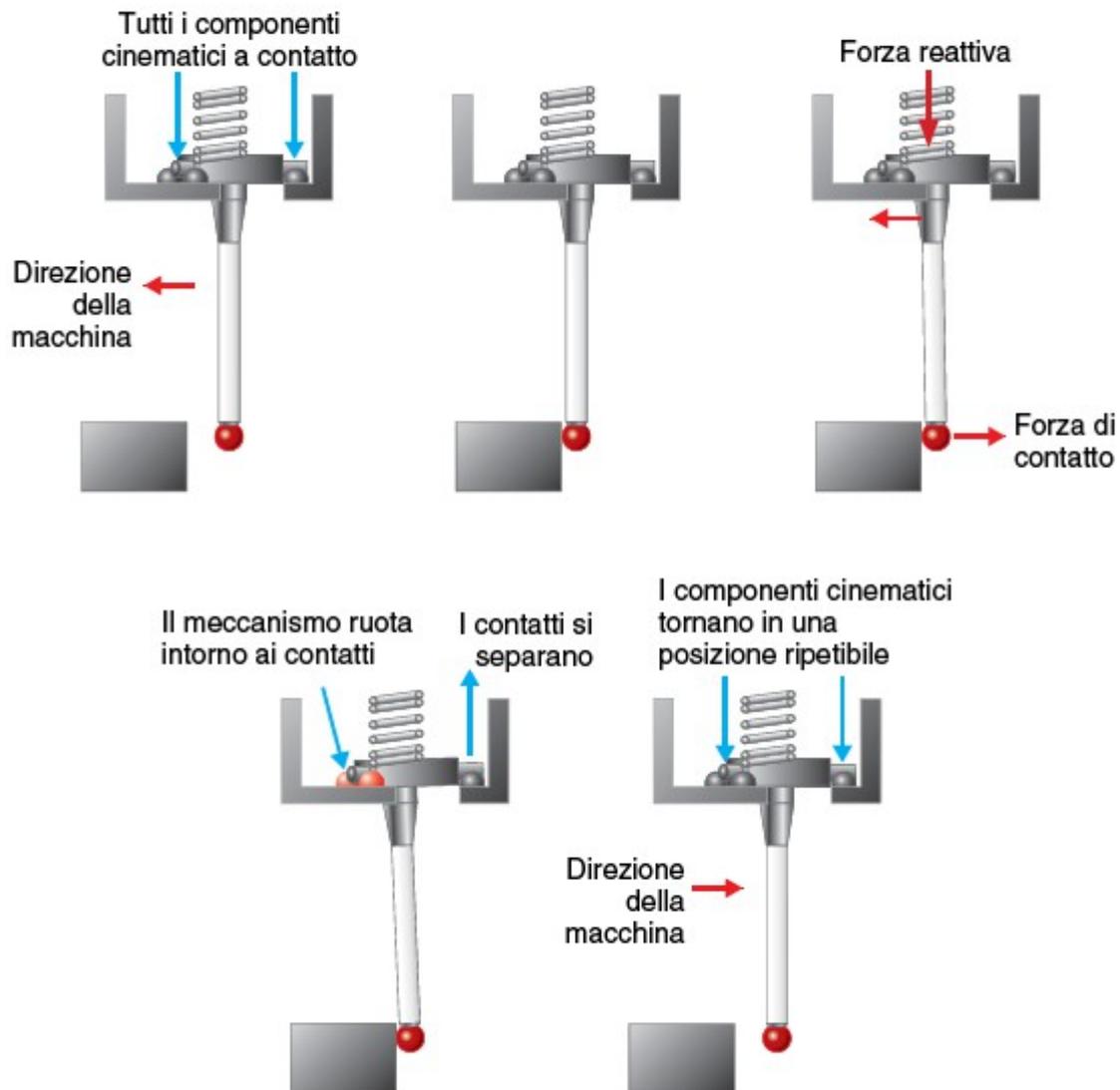


Figura 3 Procedura di acquisizione punto di una sonda cinematica resistiva. (presa da [15], pag. 2)

Le sonde con alloggiamento sferico sono alternative frequentemente utilizzate.

Sonde con alloggiamento sferico su sede conica

([15], pag. 3, figura 4)

La teoria suggerisce che questa metodologia fornisce una forza di attivazione uniforme sul piano XY. Tuttavia, le cose nella realtà possono essere molto diverse, perché tutto dipende dalla precisione del contatto fra la sfera lavorata e la superficie della sede conica. Per tale ragione le forze di scatto³ sono altamente variabili.

³ Forze che fanno "scattare" la sonda dalla propria sede

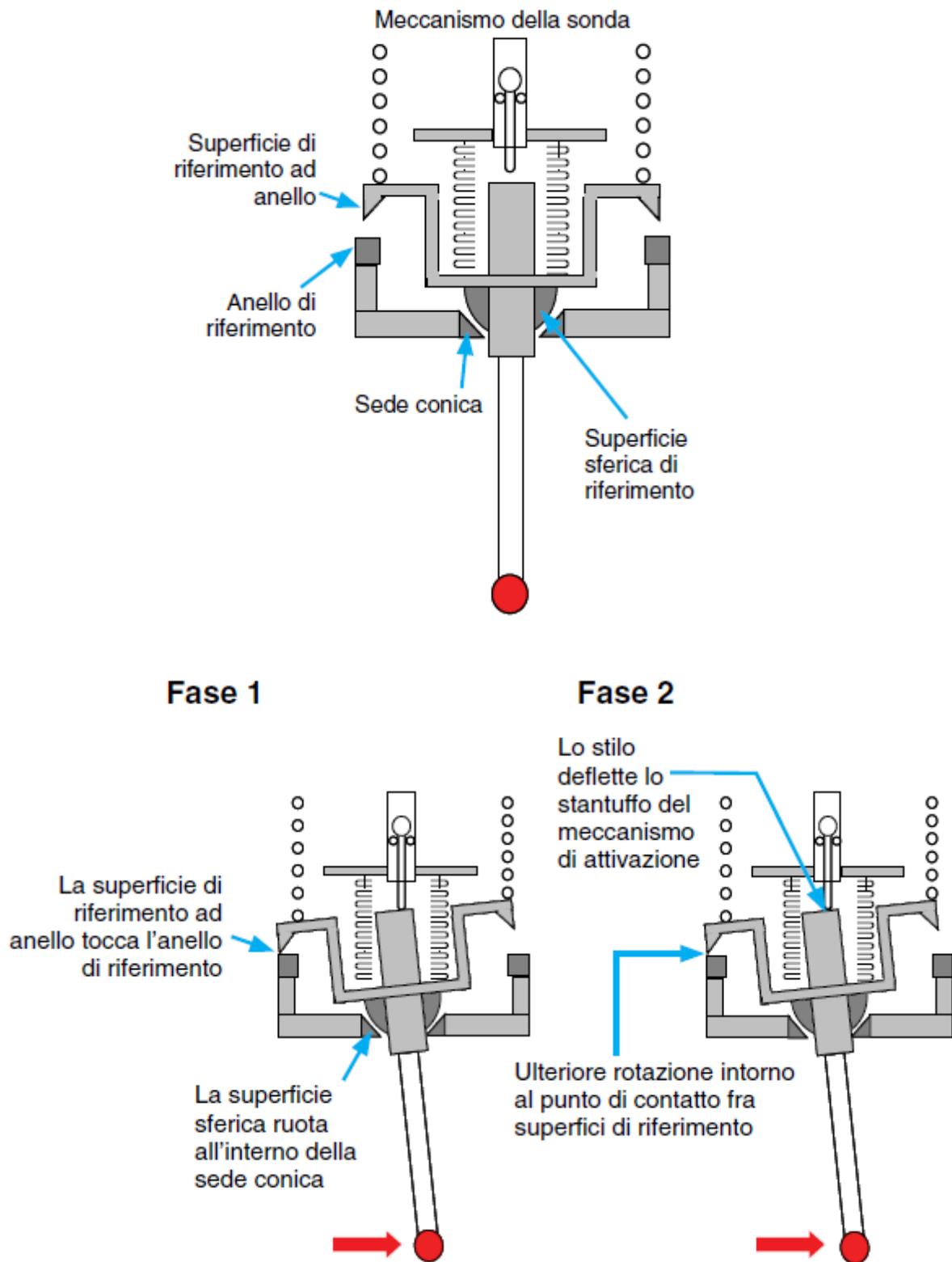


Figura 4 Sonda con alloggiamento sferico su sede conica.
 (presa da [15], pag. 3)

Gli svantaggi di questa soluzione costruttiva sono:

1. Il movimento libero del meccanismo può produrre una deflessione significativa dello stilo prima dell'attivazione della sonda.
2. Lo stilo non ha una posizione unica, perché la relazione fra sfera e sede conica non limita tutti i gradi di libertà.

3.1.2 Principio fisico della *Picza Pix-30*

Piezoelettricità⁴ o effetto piezoelettrico ([8], pagg. 261-266) è la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri. Il funzionamento di un cristallo piezoelettrico è abbastanza semplice: quando viene applicata una pressione (o decompressione) esterna, si posizionano, sulle facce opposte, cariche di segno opposto. Il cristallo, così, si comporta come un condensatore al quale è stata applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno (figura 5), viene quindi generata una corrente elettrica detta corrente piezoelettrica. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si deforma.

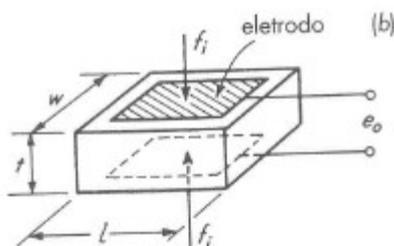


Figura 5 Trasduttore piezoelettrico. (presa da [8], pag. 262)

La caratteristica di produrre una differenza di potenziale in seguito alla compressione ha diverse applicazioni industriali. La più comune riguarda i normali accendigas da cucina, dove un cristallo sottoposto manualmente a pressione tramite un tasto fa scoccare una scintilla senza bisogno di pile di alimentazione; ma tale effetto piezoelettico

⁴ Deriva dal greco $\pi\acute{\iota}\epsilon\zeta\epsilon\iota\nu$: premere, comprimere.

è alla base anche di orologi, di oscillatori al quarzo, di iniettori diretti dei motori a scoppio, di sonde ecografiche utilizzate in campo medico e delle macchine piezoelettriche di misura.

La multinazionale giapponese Roland che produce e commercializza digitalizzatori piezoelettrici ha costituito come cuore dei propri sistemi una sonda piezoelettrica, il *Roland active piezo sensor RAPS*, che permette la digitalizzazione di modelli fisici con elevata precisione e sollecitazioni di contatto praticamente nulle. La sonda è dotata di un ago che si muove ad altissima frequenza e invia il segnale acquisito al calcolatore quando varia la sua frequenza a causa dell'interferenza con l'oggetto.

3.2 Caratteristiche tecniche e prestazionali dei due sistemi

In questa sezione per ciascuna delle due macchine, sulla base dei documenti relativi alle caratteristiche tecniche rilasciati dalle ditte costruttrici, forniremo una descrizione delle prestazioni legate alle due tecnologie.

3.2.1 Cyclone

La *Renishaw* ha commercializzato *Cyclone* (figura 6), un sistema finalizzato alla scansione di particolari di volume non superiore al prodotto tra le lunghezze di lavoro degli assi macchina (di 600 mm x 500 mm x 400 mm) e peso massimo sopportabile dalla tavola di 200 kg ([17], cap. 1, pag. 17).

La macchina, si muove su pattini ad aria compressa per ridurre gli attriti e velocizzare le operazioni di scansione, raggiungendo velocità di 1 m/min. È dotata di una sonda di tastatura analogica che applica una forza di 20 g ed è quindi idonea anche per materiali delicati ([16], pag. 683). La risoluzione assi di 5 μm è fornita dalle righe ottiche di lettura della posizione ([18], pag. 2).

Cyclone dispone del software *tracecut* per la gestione dei punti

acquisiti fino a creare programmi CNC e output per sistemi CAD. I principali vantaggi rispetto ai sistemi senza contatto sono: le superfici scansionate non richiedono trattamenti contro le riflessioni, la densità di dati non è fissa ma funzione della curvatura della superficie e garantisce migliore precisione e ripetibilità della misura.

Per contro si hanno tempi di scansione più elevati e l'applicazione di una forza sulla superficie che può danneggiare il pezzo nel caso di materiali morbidi o falsare la rilevazione nel caso di materiali flessibili ([16], pag. 682). Infine possiamo individuare un ulteriore vincolo nella minima dimensione della sonda di misura che introduce un limite intrinseco alla risoluzione dello strumento. Sebbene si



Figura 6 Sistema di scansione Cyclone. (presa da [17], pag. 77)

parli di micrometri di risoluzione di quota, il fatto di usare come utensile una punta sferica di un paio di millimetri di diametro,

impedisce di arrivare a misurare punti molto vicini orizzontalmente che stiano su quote molto diverse (per esempio piccole scanalature di qualche decina di micrometri) ([1], pag. 2).

3.2.2 Pix-30

Pix-30 (figura 7) può scansionare oggetti con dimensioni massime di 304.8 mm (larghezza, asse X) x 203,2 mm (profondità, asse Y) x 60.5 mm (altezza, asse Z), il cui peso massimo non superi i 5 Kg. Le performances della *Pix-30* permettono di digitalizzare con passi di 0.025 mm (asse Z) e di 0.05 mm fino a 5 mm (assi X e Y) con velocità di scansione di 30 mm/s sul piano XY e di 9 mm/s lungo l'asse Z. Grazie alla precisione della tecnologia Piezo la *Pix-30* può scansionare diversi tipi di oggetti inclusi quelli morbidi con cui i convenzionali scanner a contatto trovano notevoli difficoltà di acquisizione. *Pix-30* può scansionare anche i materiali trasparenti, cosa impossibile per gli scanner ottici. La *Pix-30* viene fornita con il software di scansione *Dr.Picza* ; progettato per essere usato facilmente. Questo software può ridurre la grandezza dei dati acquisiti, diminuendo la risoluzione di tutta o una parte della superficie digitalizzata, o può scansionare nuovamente parte dell'oggetto ad una risoluzione differente da quella precedentemente impostata e combinare le due nuvole di punti. La *Pix-30* supporta molteplici formati di file data in uscita inclusi DXF (CAD data), STL, VRML, 3DMF (3D formato standard) e IGES. Può inoltre esportare in formato ASCII espandendo la compatibilità con gli applicativi più comuni ([16], pagg. 680-681).

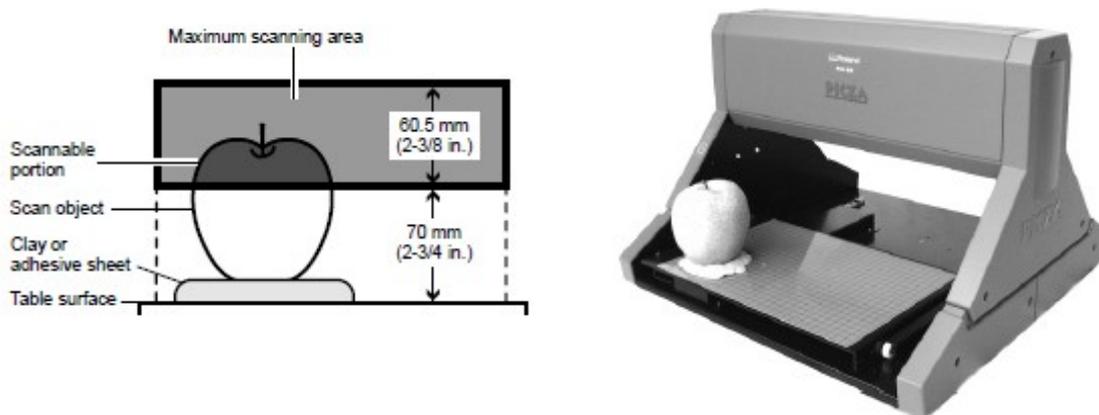


Figura 7 Sistema di scansione *Picza Pix-30*. (presa da [19], pag. 21)

3.3 Modalità di impiego

È evidente che la prima considerazione che si può fare guardando le due macchine riguarda il volume di acquisizione che offrono per le procedure di scansione. Tale volume influenza le dimensioni di ciascuna delle due macchine, e le dimensioni il loro peso. Entrambe le strumentazioni risultano trasportabili, tuttavia solamente la *Pix-30* ha a tutti gli effetti le dimensioni e il peso di una strumentazione portatile.

La *Pix-30* offre vantaggi per la scansione di piccoli oggetti da rilevare sul posto, trasportando l'apparecchiatura.

Alla luce del principio fisico che utilizzano, le scansioni con entrambe le macchine non sono influenzate dalla riflessività delle superfici, per contro il tipo di materiale risulta importante: la *Pix-30* può scansionare qualunque tipo di materiale, anche quelli particolarmente delicati e deformabili.

Il software di entrambe le macchine permette di lanciare velocemente una scansione tridimensionale, la *Pix-30* garantisce in assoluto una semplicità senza paragoni. Il software del *Cyclone* risulta complesso, ma una volta individuata la procedura per avviare le prime scansioni e acquisita manualità con esso risulta anch'esso paragonabile al *Dr.Picza* in termini di tempi di lancio di una scansione 3D.

Il peso massimo sopportabile dalla tavola restringe il campo di applicazione della *Pix-30* ad oggetti di peso non superiore ai 5 Kg.

I tempi di scansione saranno trattati con cura nel capitolo 4.

Il *Cyclone* raggiunge risoluzioni elevate (fino a 5 micrometri come già detto in 3.2.1), e sono tanto più eccellenti se paragonate a quelle offerte dalla *Pix-30*.

L'accuratezza e la precisione delle due macchine saranno prese in considerazione dopo le analisi statistiche realizzate nei successivi due capitoli.

CAPITOLO 4

Studio delle prestazioni: sfera campione rilevata con entrambe le strumentazioni e analisi dei dati

4.0 Introduzione

In questo capitolo si valutano in termini numerici le prestazioni delle due strumentazioni. Nel paragrafo 4.1 è stato realizzato uno studio del comportamento del *Cyclone* al variare di alcuni dei principali parametri di scansione. Nelle sezioni 4.2 e 4.3 è stata realizzata l'analisi di due nuvole di punti, catturate con ciascuna delle due macchine, rispetto ad una nuvola di riferimento. Nel paragrafo 4.4 sono state condotte scansioni con diversi valori di risoluzione in modo da definire degli andamenti risoluzione/tempo per le due macchine.

4.1 Effetto di alcuni parametri di scansione sul comportamento del *Cyclone*

In questo paragrafo si studiano gli effetti prodotti sul *Cyclone* dai diversi valori numerici inseriti nelle griglie pre-scansione del software della strumentazione.

4.1.1 Effetto del passo nominale di scansione sul numero di punti acquisiti

Per capire come vengono acquisiti i punti dal *Cyclone* ho fatto alcune prove, eseguite tenendo conto di quanto è riportato nel manuale d'uso della macchina sia per scegliere in che modo acquisire i punti sia per interpretare i risultati.

Il manuale del software precisa che la distanza tra due punti di scansione lungo la generica linea di scansione (passo nominale di scansione) viene gestita diversamente dal *Cyclone* a seconda che si tratti di una linea di scansione rettilinea o curvilinea. Durante la scansione con il *Cyclone* il passo effettivo del punto effettivo viene controllato tramite due parametri:

1. Il passo nominale di scansione
2. Un parametro di errore cordale

I punti vengono catturati con il passo specificato a meno che questo non significhi che un eventuale errore che si determini fra ogni punto (=errore cordale, definito geometricamente in figura 1) risulti maggiore della tolleranza cordale. In questo caso infatti i punti vengono catturati in una posizione che non superi la tolleranza cordale.

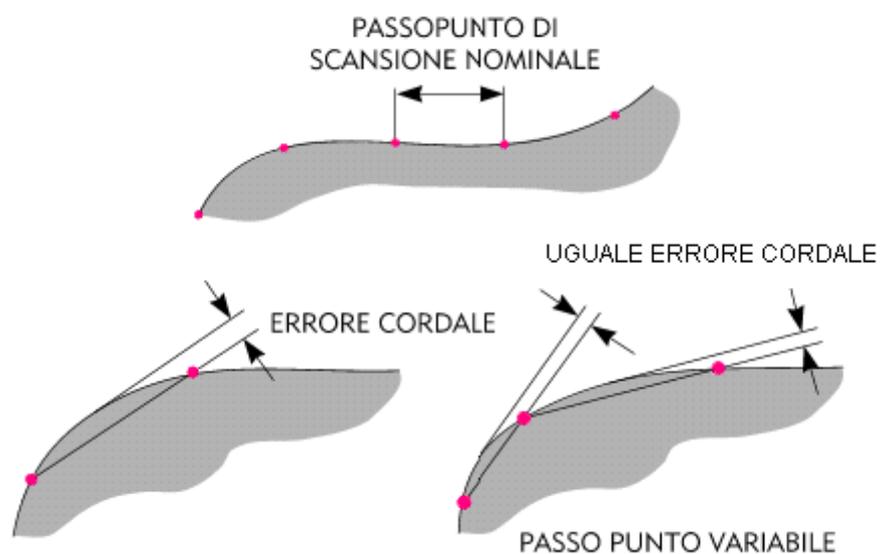


Figura 1 Passo nominale di scansione ed errore cordale.
(Presa dal manuale installato in Tracecut 22)

La tolleranza cordale nei tratti non rettilinei ha la priorità assoluta sul passo nominale di scansione, sia se il suo valore è in difetto, sia se in eccesso rispetto al valore di passo nominale di scansione: in pratica, nei tratti curvilinei non comanda più il passo nominale e si risente della sola influenza della tolleranza cordale. I tecnici della Renishaw di Torino consigliano di lavorare con gli stessi valori di tolleranza cordale e passo nominale di scansione, ciò per non risentire di alcuni degli effetti negativi prodotti da valori di tolleranza cordale troppo alti. Valori di tolleranza cordale minori del passo nominale hanno l'effetto positivo di incrementare il numero di punti catturati dalla sonda nei tratti curvilinei, infittendo localmente la normale distribuzione di punti; invece valori di tolleranza cordale maggiori del passo nominale di scansione portano a veri e propri vuoti di punti, cioè il sistema cercando di raggiungere l'errore cordale impostato cancellerà tutti quei punti di passo nominale più piccolo compresi tra i due punti che rispettano la condizione imposta dall'errore cordale. Il risultato di questo tipo di scansione è pessimo e si consiglia di evitarlo per non incorrere in scansioni prive di significato algoritmico.

Nella prima prova ho scansionato la custodia di un cd-rom; la scansione è stata generata sul piano XY ed è stata di tipo chiuso, cioè la sonda ha chiuso il profilo riportandosi al termine dell'esecuzione nelle coordinate di inizio scansione. La scansione è stata eseguita con precise caratteristiche di lavoro, infatti sono stati scelti identici i valori di passo nominale e tolleranza cordale e pari a 1.0 e velocità di sondaggio di 100 su 1000.

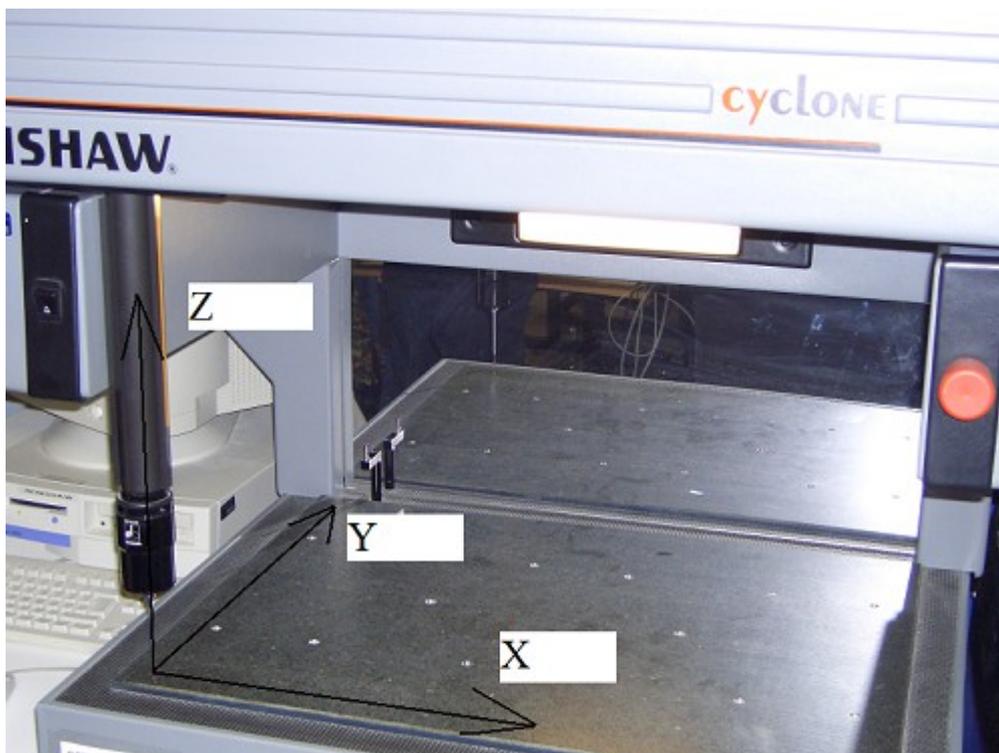


Figura 2 Terna di riferimento prestabilita dalla macchina

Voglio precisare che l'analisi delle coordinate dei punti risulta di fondamentale importanza per effettuare un confronto tra le due strumentazioni di scansione perchè i parametri di lavoro da immettere nel software Tracecut 22 del *Cyclone* sono privi di unità di misura, quindi i valori di passo nominale e velocità di scansione inseriti acquistano un senso solo se confrontati con i risultati di una scansione. Inoltre pensando alla velocità di scansione come ad un possibile fattore di influenza sulla accuratezza delle coordinate dei punti ci si è cautelati scegliendo in questa prima prova una velocità estremamente ridotta (pari a 100). Vale la pena indicare che al fine di evitare errori dovuti all'uso del sistema di riferimento della macchina, indicato in figura 2, si è generata una terna solidale con l'oggetto da scansione (terna di figura 3).

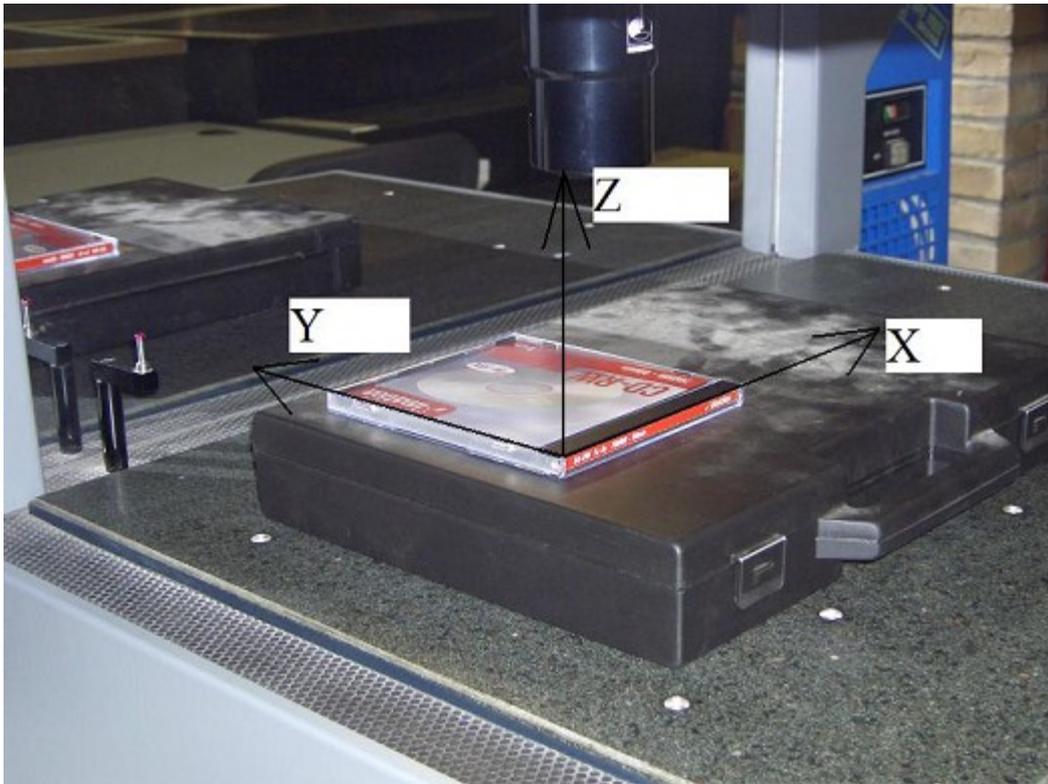


Figura 3 Nuova terna di riferimento, solidale con l'oggetto

I primi 15 punti di scansione individuano quella parte di profilo che dal valore +14.4721 sull'asse delle x in direzione dei negativi porta a +0.0846. Il valore di Z indicato rappresenta l'altezza a cui è stato generato il profilo, o altezza di profilo.

X	14.4721	Y	-2.0156	Z	-4.9917	X	6.2866	Y	-2.0603	Z	-5.0027
X	13.4642	Y	-1.9914	Z	-4.9917	X	5.2487	Y	-2.0378	Z	-5.0008
X	12.4289	Y	-2.0370	Z	-4.9997	X	4.2106	Y	-2.0545	Z	-5.0049
X	11.4149	Y	-2.0398	Z	-4.9996	X	3.1715	Y	-2.0631	Z	-5.0070
X	10.3960	Y	-2.0185	Z	-4.9987	X	2.1380	Y	-2.1358	Z	-5.0108
X	9.3568	Y	-2.0501	Z	-5.0047	X	1.1236	Y	-2.3465	Z	-5.0012
X	8.3467	Y	-2.0429	Z	-4.9976	X	0.0846	Y	-2.3502	Z	-5.0103
X	7.3178	Y	-2.0446	Z	-5.0087						

Da questo insieme di punti catturati sulla parte di profilo rettilinea della custodia risulta evidente il valore di distanza tra un punto e il successivo, di circa 1 mm. Perciò i valori di passo nominale di scansione immessi nel software Tracecut 22 sono valori in millimetri.

Il campione di punti scelto inoltre può essere considerato come

rappresentativo perchè per tutti i possibili campioni di punti si riscontra lo stesso salto tra i punti di 1 mm.

4.1.2 Effetto della velocità di scansione sulla accuratezza del passo di scansione

L'effetto della velocità di scansione sull'accuratezza dei punti è stato calcolato prendendo per ciascun valore di velocità il campione rappresentativo costituito dai primi 15 punti di scansione. Dai 15 punti di partenza si ottengono 14 numeri dati dalla differenza di ciascun numero con quello successivo, partendo dal primo dei 15 numeri. Questi 14 valori rappresentano i passi effettivi di scansione che ci sono tra i primi 15 punti. A questo punto ho fatto la media aritmetica per ciascun valore di velocità dei 14 passi effettivi di scansione, ottenendo così 10 valori medi del passo reale di scansione per ciascun valore di velocità.

Dal grafico di figura 4 si rileva che la macchina lavora in condizioni di massima accuratezza (sul passo di scansione) in corrispondenza delle velocità intermedie.

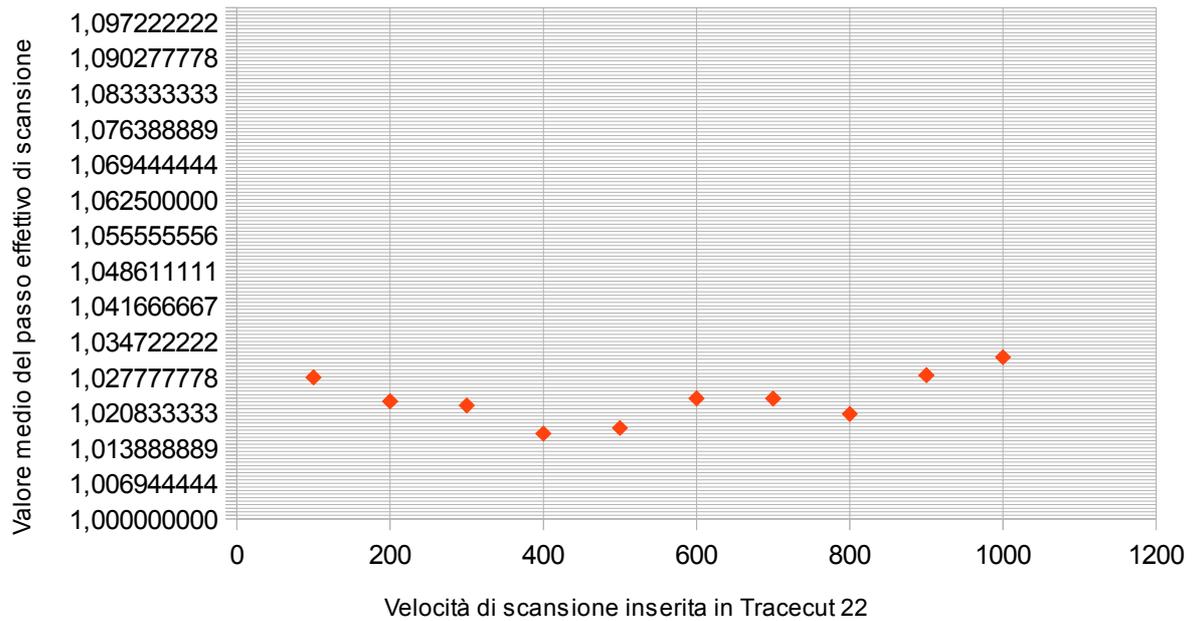


Figura 4 Valore medio del passo effettivo di scansione rispetto alla velocità di scansione

4.1.3 Effetto della velocità di scansione sul numero di punti

Innanzitutto con alcune prove cronometrate si è cercato di dare un senso al campo di velocità di scansione gestibile tramite il software del *Cyclone*. Così si sono cronometrati i tempi di esecuzione di un profilo chiuso perfettamente noto nella sua lunghezza utilizzando diversi valori di velocità.

Il trend venuto fuori dalle prove (figura 5) è risultato di tipo lineare e il campo di velocità di scansione del *Cyclone* compreso tra 1.64 e 16.4 millimetri al secondo.

Si è pensato di valutare e quantificare l'effetto della velocità di scansione sul numero di punti mantenendo fermi tutti gli altri parametri di lavoro, cioè tale tipo di prova è stata effettuata realizzando il profilo chiuso del cd-rom sul piano XY con sonda sferica di 4.0 mm di diametro, tolleranza cordale e passo nominale di 1.0 mm e velocità di scansione variabile tra 100 e 1000 con passo di 100.

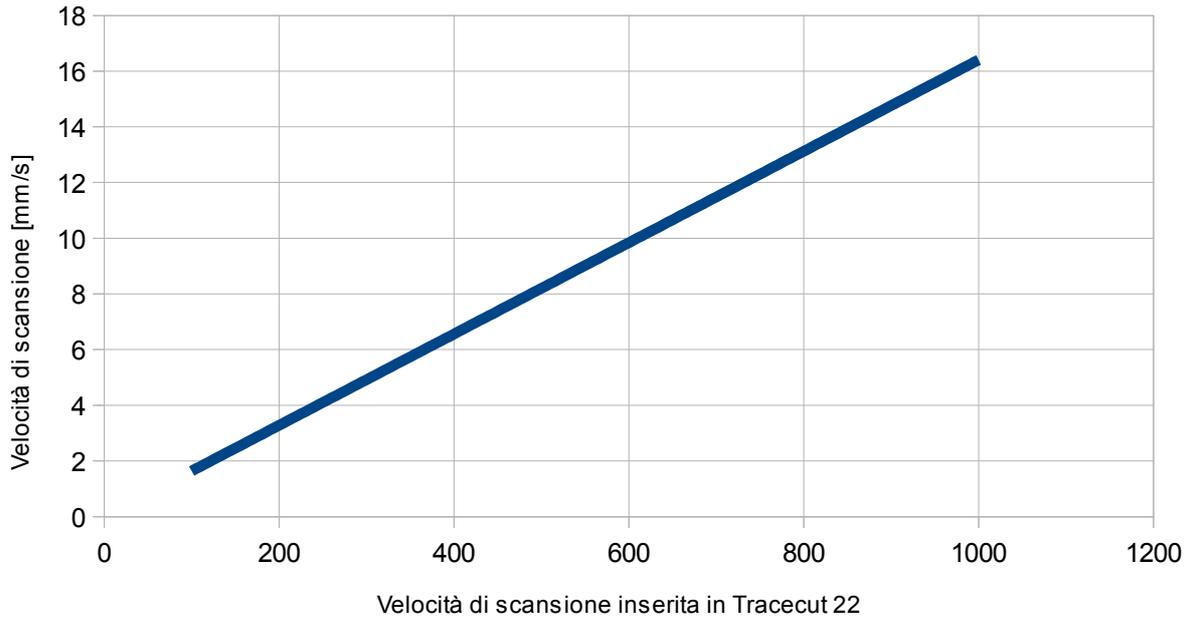


Figura 5 Velocità di scansione in millimetri al secondo su velocità di scansione inserita in Tracecut 22

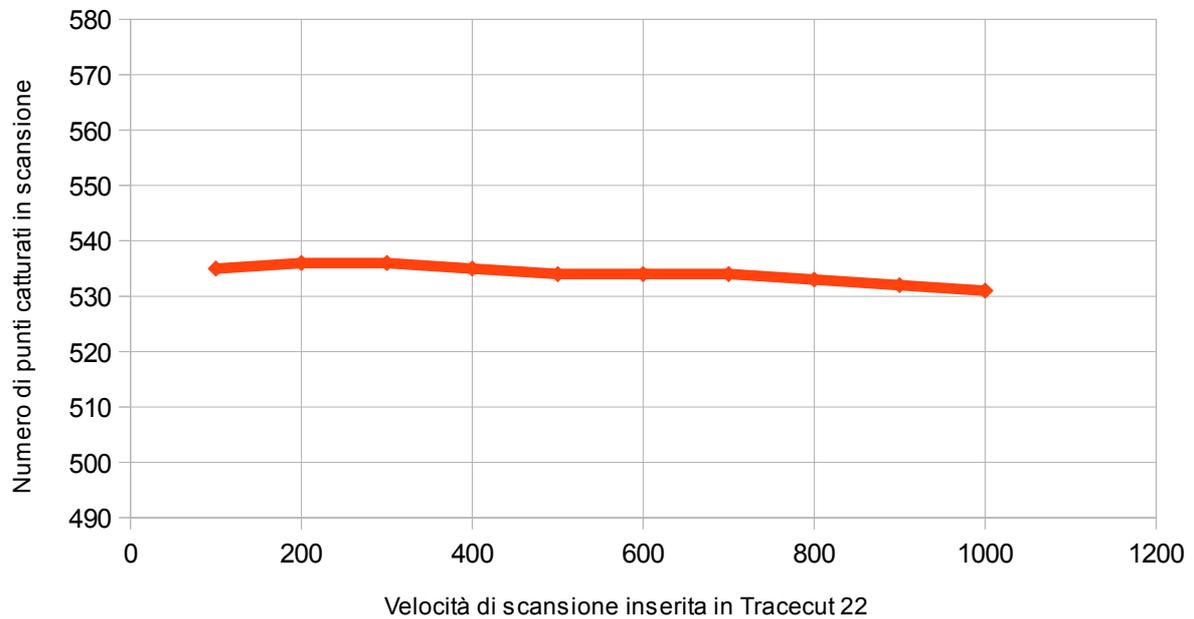


Figura 6 Numero di punti catturati in scansione in funzione della velocità di scansione

Il trend risultante (grafico di figura 6) mostra che sull'intero campo di velocità il numero di punti varia tra i 536 e i 530 punti,

si ha altresì un andamento del numero di punti costante con eccellente approssimazione.

4.2 Rilievo della sfera campione con il *Cyclone* e analisi statistica

L'idea è stata quella di realizzare scansioni con lo stesso numero di punti, portando la *Pix-30* in condizioni di risoluzione massima e avvicinando a tale risoluzione il *Cyclone*.

Oggetto della scansione è stata la sfera lavorata di diametro 50 millimetri di figura 7 (che da ora chiameremo sfera campione).

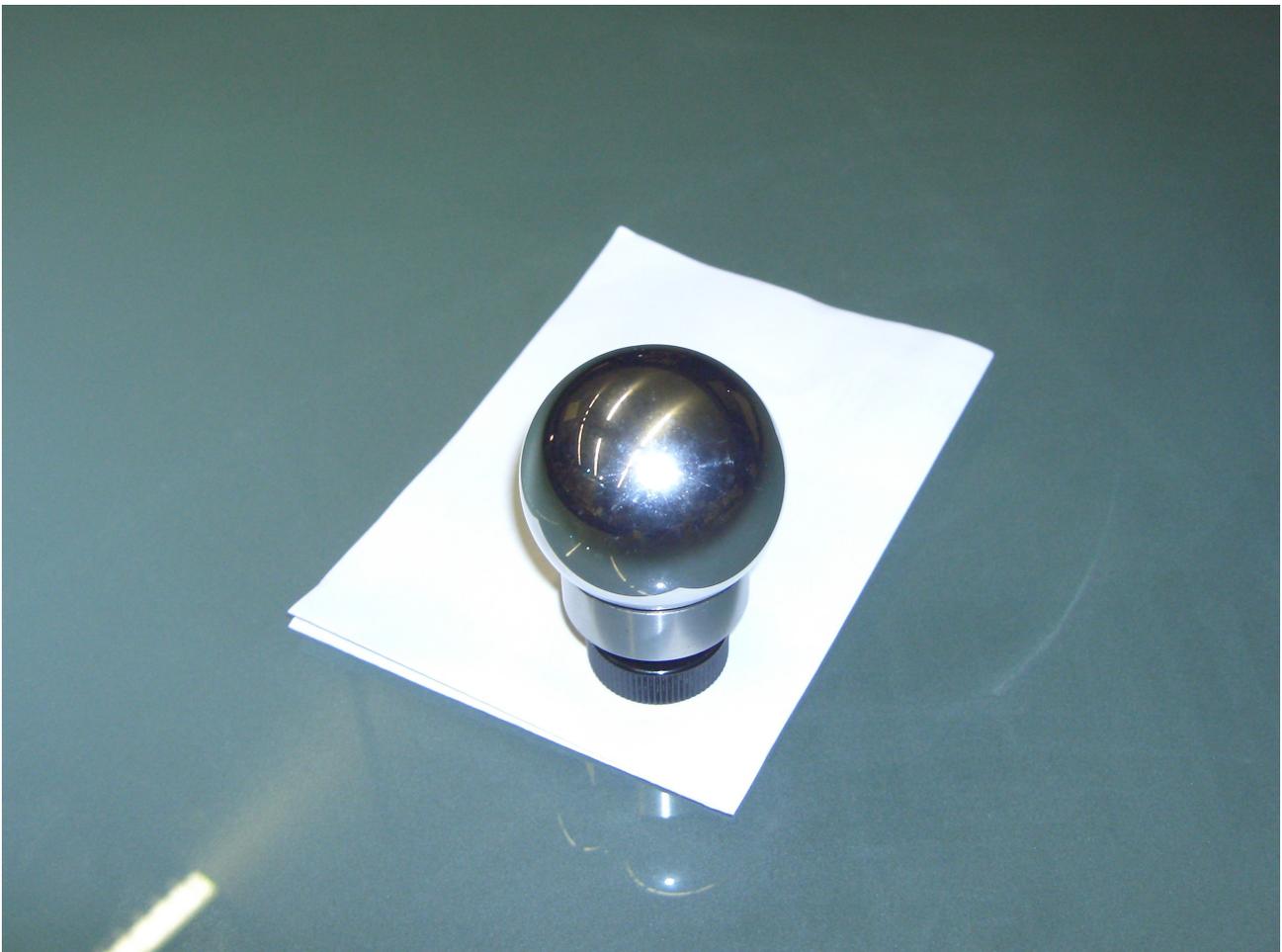


Figura 7 Sfera campione

4.2.1 Accuratezza

Nella sezione 2 del capitolo 3 si è trattato della risoluzione delle due macchine, servendoci dei documenti sulle caratteristiche tecniche forniti dalle ditte. Esistono tuttavia parametri di accuratezza e precisione che identificano ciascuna delle due macchine sebbene essi non siano riportati nei documenti delle caratteristiche. In realtà la *Renishaw* per la sua macchina *Cyclone* fornisce un test di accuratezza, esso è inizializzabile da Tracecut in condizioni operative del *Cyclone*, e garantisce in condizioni di perfetto funzionamento della macchina, una accuratezza di misura non superiore al valore assoluto di 50 micrometri.

Un test di fiducia (infatti così viene denominato dalla *Renishaw* questo genere di prova comprovante l'accuratezza limite) realizzato sulla nostra macchina non ha dato i risultati attesi.

Questo tipo di problema ha richiesto una attenzione di primaria importanza ed è stato opportuno occuparci di esso, ovviamente prima di effettuare le scansioni. In sostanza con l'aiuto del tecnico che segue la macchina siamo riusciti a correggere quest'errore agendo direttamente sull'elaborazione dei dati acquisiti dalla sonda, in questo modo è stata fatta rientrare l'accuratezza nei limiti senza agire fisicamente sulla strumentazione.

Nel concludere questo interessante aspetto riporto in figura 8 il test di fiducia realizzato con successo.

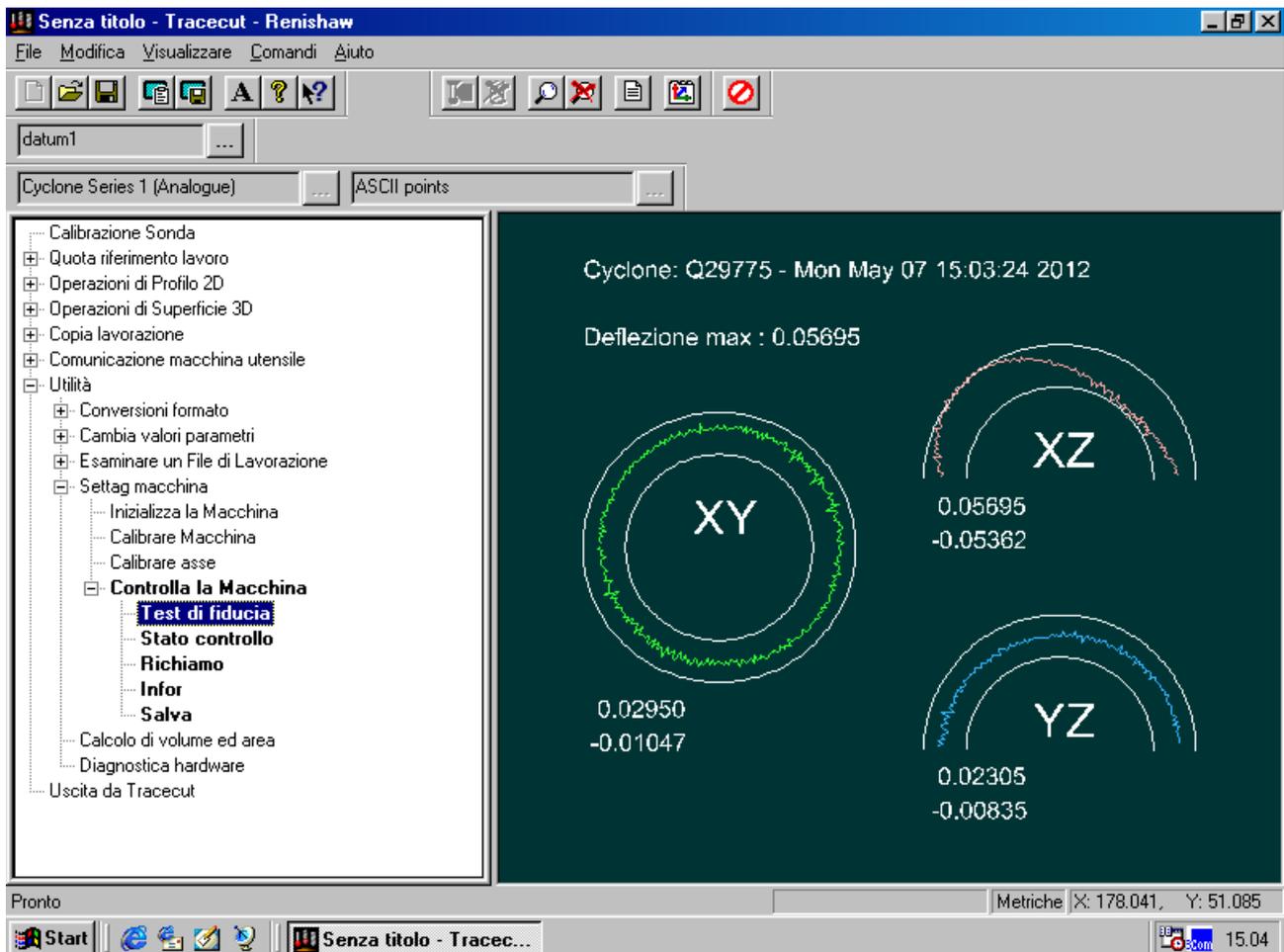


Figura 8 Test di fiducia del 7 maggio 2012

Dalla grafica di figura 8 è possibile vedere che sebbene l'errore sull'accuratezza sia in generale inferiore ai 50 micrometri, comandando alla sonda moti lungo fette XZ (per ogni Y la sonda scansiona il profilo accumulando fette in XZ) si raggiunge il massimo errore ammissibile, che, seppure entro i limiti di tolleranza, è un errore molto significativo.

Quest'ultimo problema è stato risolto programmando scansioni dei profili lungo piani YZ, accumulando fette di scansione nella direzione di accrescimento X. L'errore massimo in queste condizioni di scansione non supera i 23 micrometri.

4.2.2 Rilievo della sfera

Tempo di scansione: 3 h e 15 min

Numero di punti: 792903

Risoluzione: 0.05 mm, tale da avere un numero di punti confrontabile con la scansione dello stesso oggetto con la *Pix-30* in condizioni di massima risoluzione.

Il rilievo 3D della semisfera è stato eseguito assegnando innanzitutto alla sonda un'area di lavoro in XY, oltre la quale non spingersi. Quest'area è delimitata da un quadrato che circoscrive un cerchio di 25 millimetri di raggio, realizzato scansionando sul piano XY la circonferenza massima (e quindi di raggio massimo di 25 mm, in figura 9) della sfera campione.

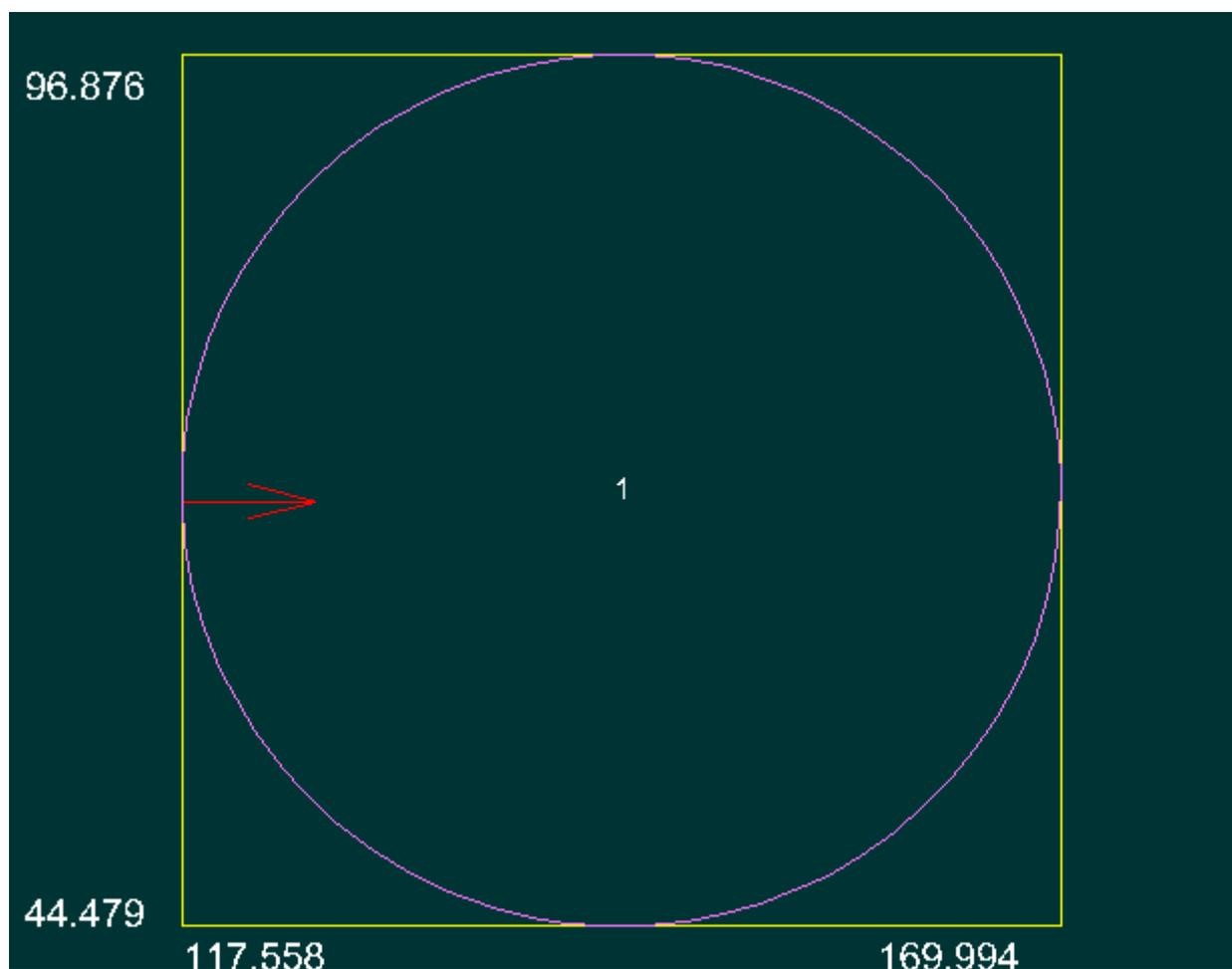


Figura 9 Scansione con il *Cyclone* sul piano XY della sezione di raggio 25 mm

All'interno di quest'area si è comandato alla sonda di rilevare nella direzione di accrescimento X (freccia rossa di figura 9) lungo i piani YZ (assi ortogonali di una terna sinistra) e tra le quote $Z=0$ (quota in corrispondenza della sezione di figura 9) e $Z=25$ mm i punti

della semisfera, con un passo di scansione e un salto tra le linee di scansione identico e pari a 0.05 mm. La figura 10 rende l'idea dell'acquisizione tridimensionale della nuvola, essa è stata rilevata durante l'esecuzione del profilo.

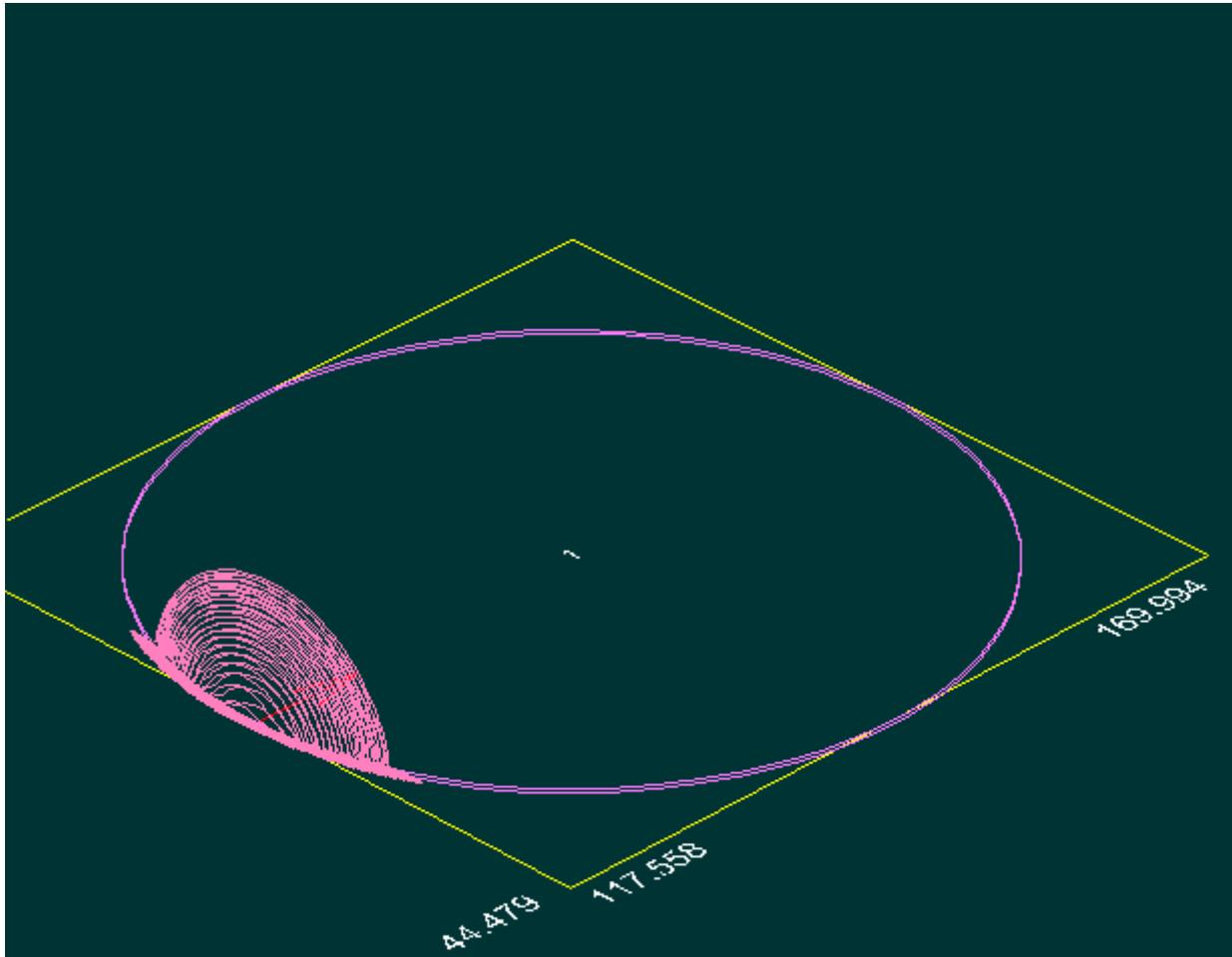


Figura 10 Nuvola catturata durante l'esecuzione del profilo tridimensionale

A questo punto la nuvola ottenuta è stata esportata in STL, tenendo presente due cose importanti legate al *Cyclone*:

- 1) Per l'esportazione viene chiesto di inserire i valori di passo e salto di scansione. A questo punto lasciare 0 e 0 rispettivamente (che sono poi i valori di default) significa esportare l'STL con i valori di tolleranza cordale e distanza di passaggio impostati per la scansione del 3D. Volendo, è possibile inserire dei valori più stringenti di quelli utilizzati per la scansione, esportando un file STL più

''infittito'': questo è possibile perchè il *Cyclone* con i valori della scansione genera per l'esportazione una superficie approssimante che può coprire qualunque genere di salti e passi, anche se, ovviamente, questo si paga con una riduzione della accuratezza rispetto a quella che si avrebbe nelle condizioni di scansione 3D ''infittita''. Generare invece una nuvola con dei valori meno stringenti rispetto a quelli della scansione porta si ad un STL ineccepibile ma a scapito di un tempo di scansione superiore. In conclusione, alla fine conviene esportare la nuvola con i valori di default (passo=0 e salto=0).

- 2) Il flusso di lavoro del *Cyclone* presenta una particolarità a esportazione ultimata, poiché nel momento in cui si esporta in STL il *Cyclone* prende la nuvola, la gira (da positivo a negativo) e la specchia (intorno ad Y). Praticamente prima di esportare occorre tra le opzioni del menù cliccare sulla voce ''Trasformazione'', in modo da girare e specchiare la nuvola così che durante l'esportazione e l'automatica operazione generata dal *Cyclone* salta fuori una nuvola normale! Questo processo sarebbe da articolare con immagini ed esempi, ma credo risulti più esauriente rimandare alla voce ''Trasformazione'' del manuale del *Cyclone* presente nel software Tracecut 22.

4.2.3 Allineamento della nuvola di punti in *Rapidform* e *shell deviation*

Per valutare le caratteristiche di accuratezza e precisione del *Cyclone* ho generato con l'applicazione *Rhinoceros* 4.0 (da ora per brevità *Rhino*) una *shell* STL di circa 1 milione di punti partendo dalla creazione di una semisfera di 25 mm di raggio.

Ho importato in *Rapidform* la *shell* relativa alla sfera campione generata dalla scansione 3D con il *Cyclone* (di estensione STL) e quella generata da *Rhino*, ed utilizzando i comandi *register shell* (realizza l'allineamento delle nuvole attraverso la scelta di punti omologhi tra le *shell*, vedi figura 11) e *shell deviation* (calcola in termini statistici la deviazione tra le due *shell*, vedi figura 12) ho

ottenuto i valori di *minimum distance*, *maximum distance*, *average distance* e *standard deviation*.

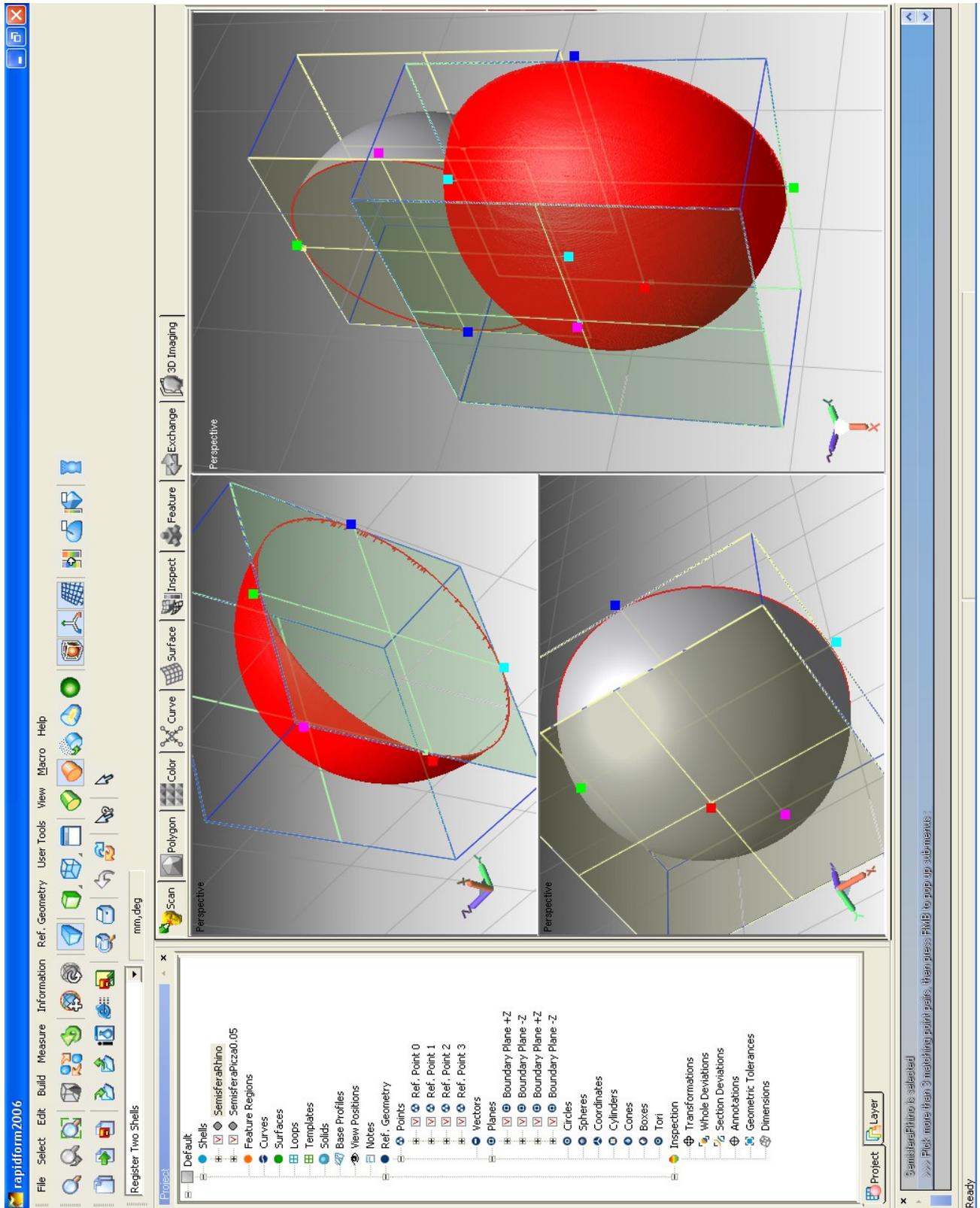


Figura 11 Interfaccia del software Rapidform per la registrazione delle shell

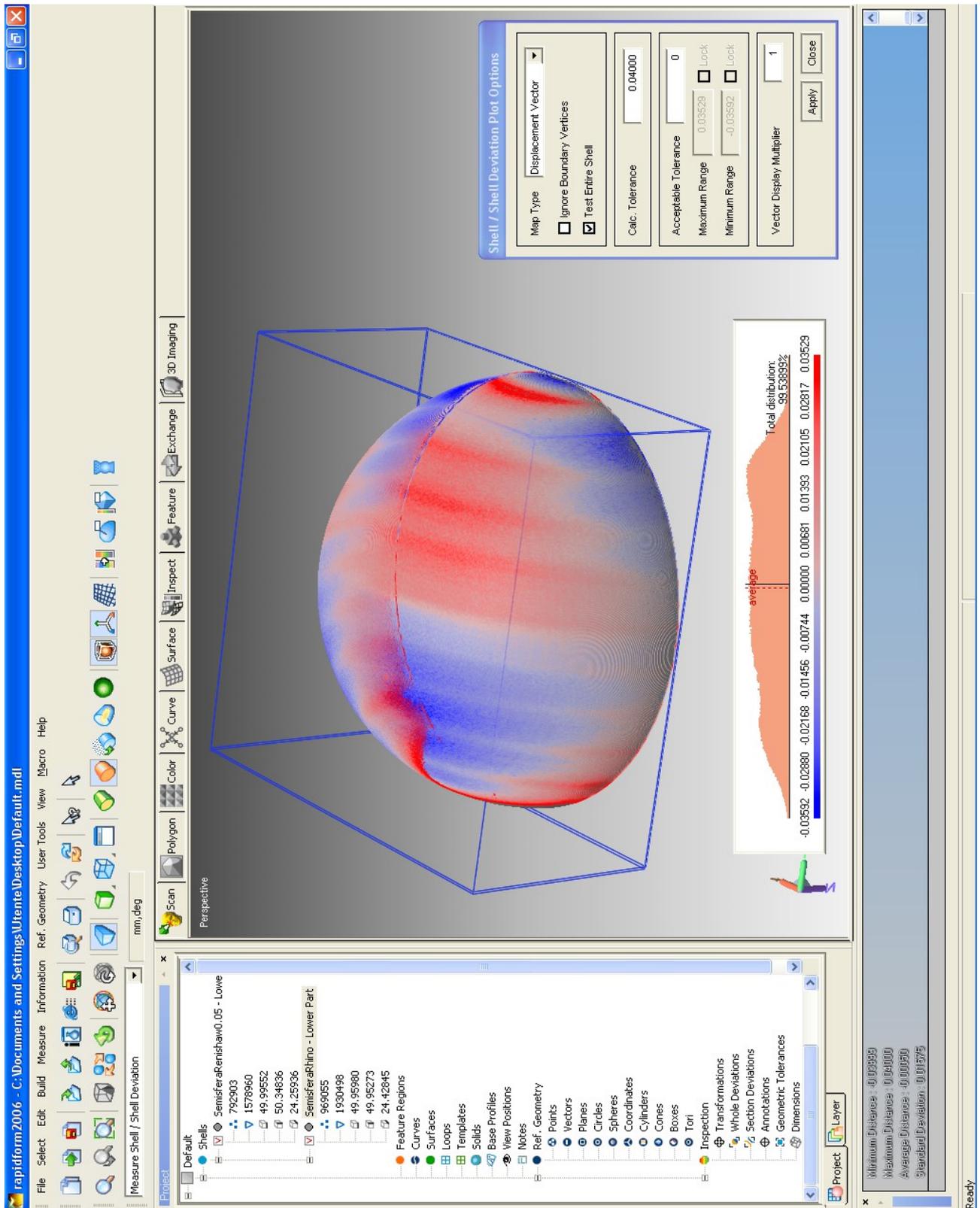


Figura 12 Risultato della deviazione tra *shell*, Rapidform

La deviazione standard (*standard deviation*) o scarto quadratico medio è un indice di dispersione delle misure sperimentali, vale a dire è una stima della variabilità di una popolazione di dati. È uno dei modi per esprimere la dispersione dei dati intorno ad un indice di posizione, quale può essere, ad esempio, il valore atteso (*average distance*). La deviazione standard ha la stessa unità di misura dei valori osservati ed è stata introdotta in statistica con la lettera greca σ .

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}{N}}$$

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

La precisione di una misura (vedi la sezione 2.1) è una definizione espressa in chiave statistica e coincide con la deviazione standard; per cui la precisione del *Cyclone* (assumendo che il campione di punti catturati sia rappresentativo di una popolazione sufficientemente grande di campioni) è data dal valore di deviazione standard del grafico di figura 12. L'accuratezza limite della macchina sotto le stesse ipotesi di rappresentatività del campione (in linea con la definizione data in 2.1) e al 99.539 % della distribuzione risulta:

- Accuratezza minima al 99.539 %: -0.03999 mm (*minimum distance* di figura 12)
- Accuratezza massima al 99.539 %: 0.04000 mm (*maximum distance* di figura 12)
- Precisione: 0.01575 mm (*standard deviation* di figura 12)

4.3 Rilievo della sfera campione con la *Pix-30* e analisi statistica

Tempo di scansione: 81 h e 45 min

Numero di punti: 812287

Risoluzione: 0.05 mm

Il rilievo della sfera con la strumentazione *Pix-30* ha richiesto, secondo lo stesso principio del *Cyclone*, di individuare un' area di scansione piana (parallela al piano di appoggio) che racchiudesse le dimensioni massime della sfera e due quote limite in Z, tali da creare il volume limite per il moto dell'ago di misura (figura 13). Secondo la stessa logica della sezione 4.2.3 è stata eseguita la registrazione della *shell* STL contenente le informazioni di scansione della sfera campione realizzata con la *Pix-30* con la *shell* STL generata dal software *Rhino*, ed è stata valutata la deviazione tra le *shell* (vedi figura 15).

- Accuratezza minima al 99.572 %: -0.26817 mm (*minimum distance* di figura 15)
- Accuratezza massima al 99.572 %: 0.26999 mm (*maximum distance* di figura 15)
- Precisione: 0.11518 mm (*standard deviation* di figura 15)

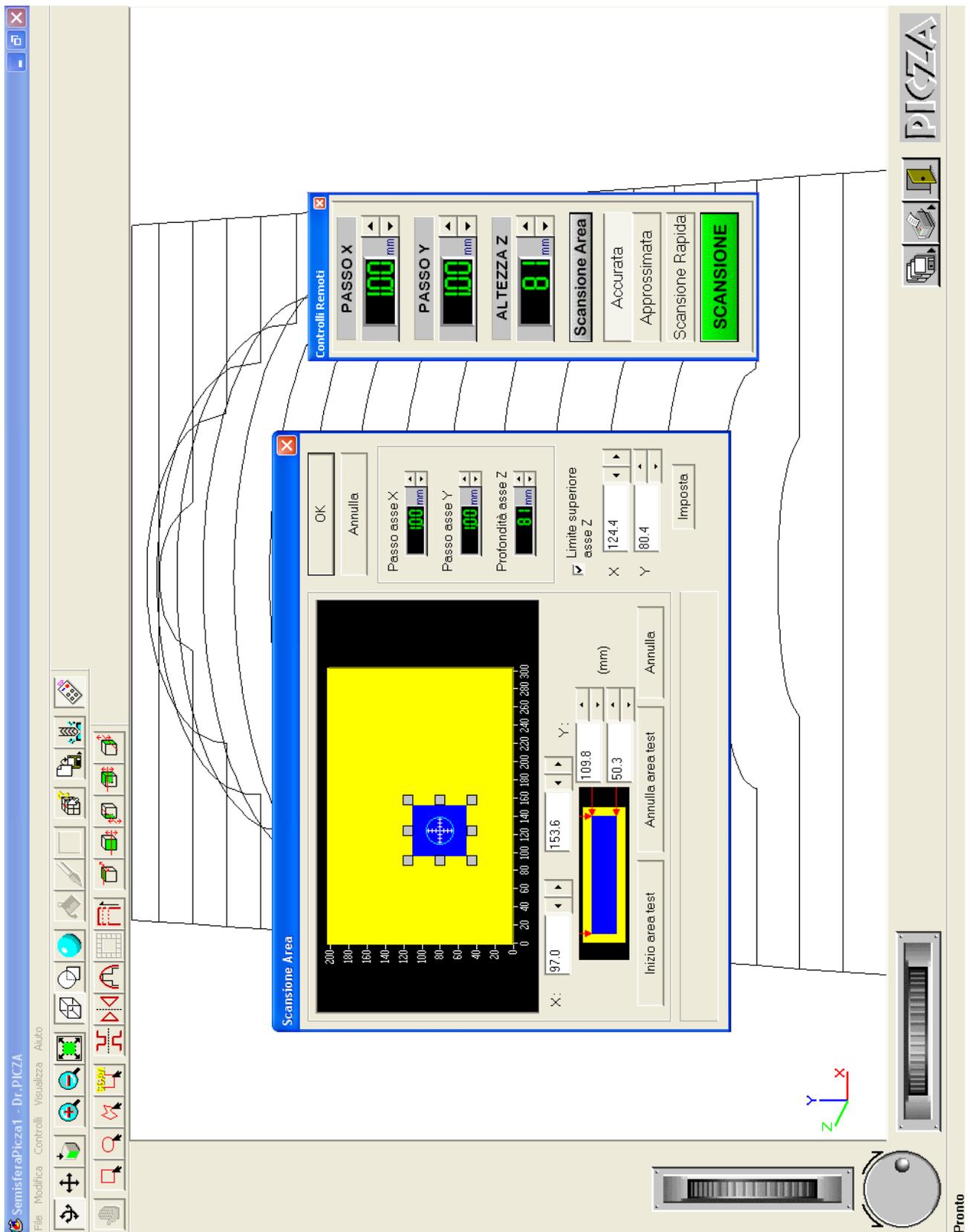


Figura 13 Interfaccia del software *Dr.Picza* per l'impostazione dei parametri di scansione

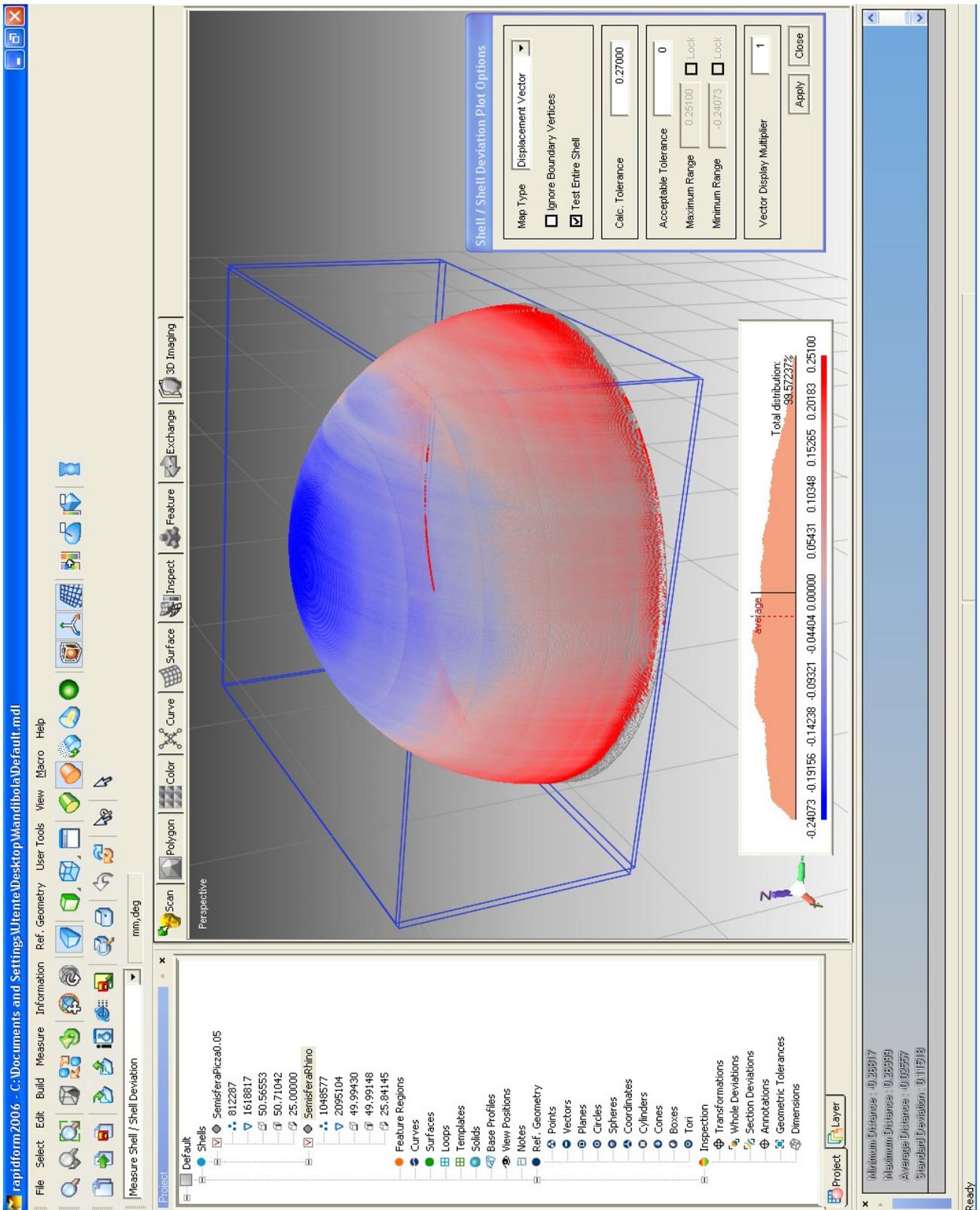


Figura 15 Risultato della deviazione tra *shell*, Rapidform

4.4 Andamenti risoluzione/tempo relativi alle due strumentazioni

Entrambi gli andamenti (figure 16 e 17) sono relativi a scansioni della sfera campione, precisamente all'area della semicalotta superiore.

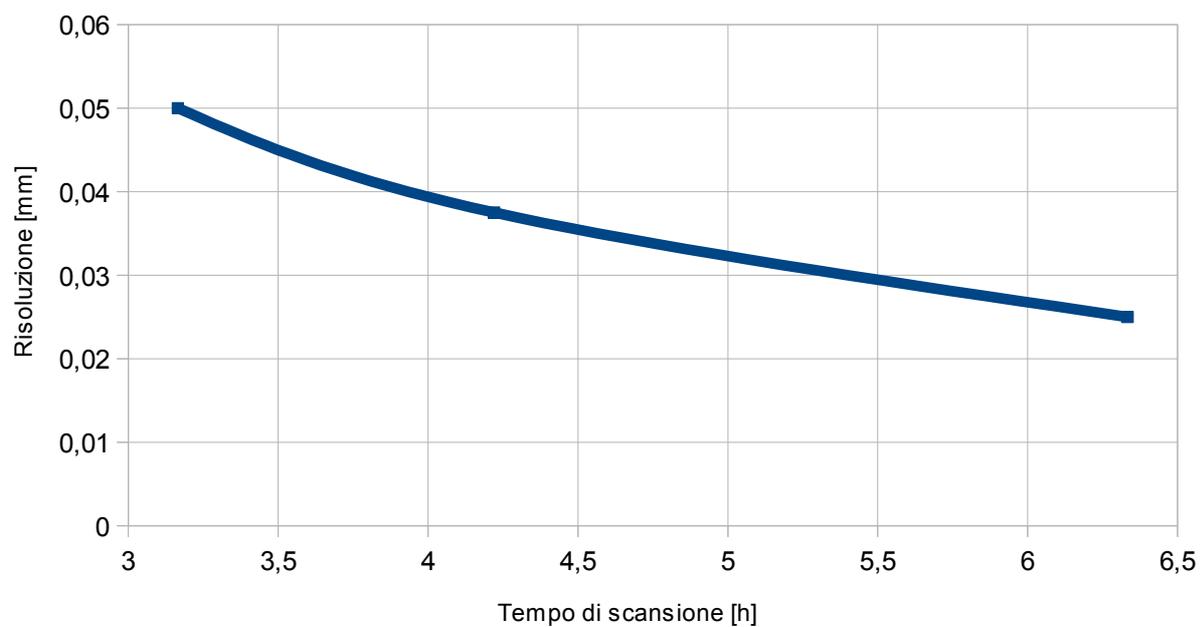


Figura 16 Grafico risoluzione/tempo ottenuto da più scansioni con il *Cyclone*

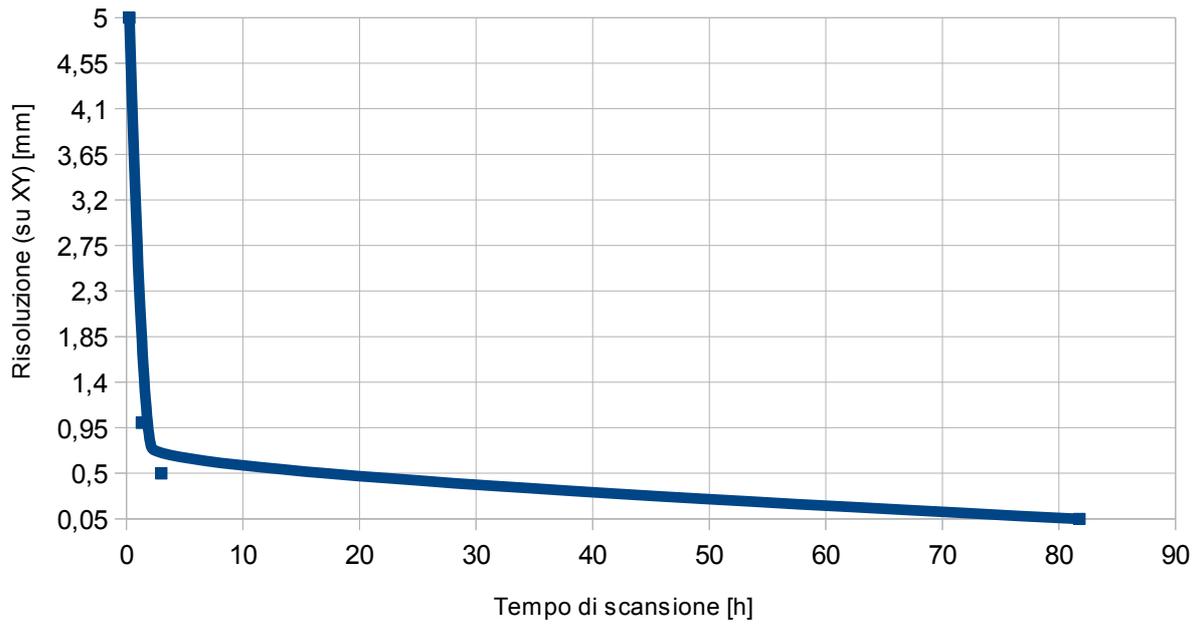


Figura 17 Grafico risoluzione/tempo ottenuto da più scansioni con la *Pix-30*

CAPITOLO 5

Studio di un caso concreto: rilievo di un concio lapideo con i due sistemi e analisi dei risultati

5.0 Introduzione

In questo capitolo ho scansionato con le due strumentazioni un concio lapideo di interesse storico (vedi figura 2), rinvenuto presso il castello di Cusercoli (FC) dove ha sede il laboratorio di archeoingegneria (CAILab, figura 1). Nelle sezioni 5.1 e 5.2 vengono documentate le operazioni di rilievo del concio rispettivamente con il *Cyclone* e con la *Pix-30*. Nell'ultima sezione del capitolo (la 5.3) è collocata l'analisi sulla deviazione delle due *shell* realizzata in *Rapidform*.



Figura 1 Laboratorio di archeoingegneria a Cusercoli



Figura 2 Concio lapideo oggetto delle scansioni, in cui sono presenti dei graffiti con una data (1819), relativa al periodo di ristrutturazione di un'ala del complesso

5.1 Rilievo con il Cyclone

Tempo di scansione: 7 h

Numero di punti: 78668

Risoluzione: 1 mm

Come di consueto si è realizzata una scansione del profilo del concio sul piano XY (piano parallelo piano di lavoro) ad una quota Z che permettesse di contenere tutte le fette di profili in XY del concio per ogni Z (vedi figura 3).

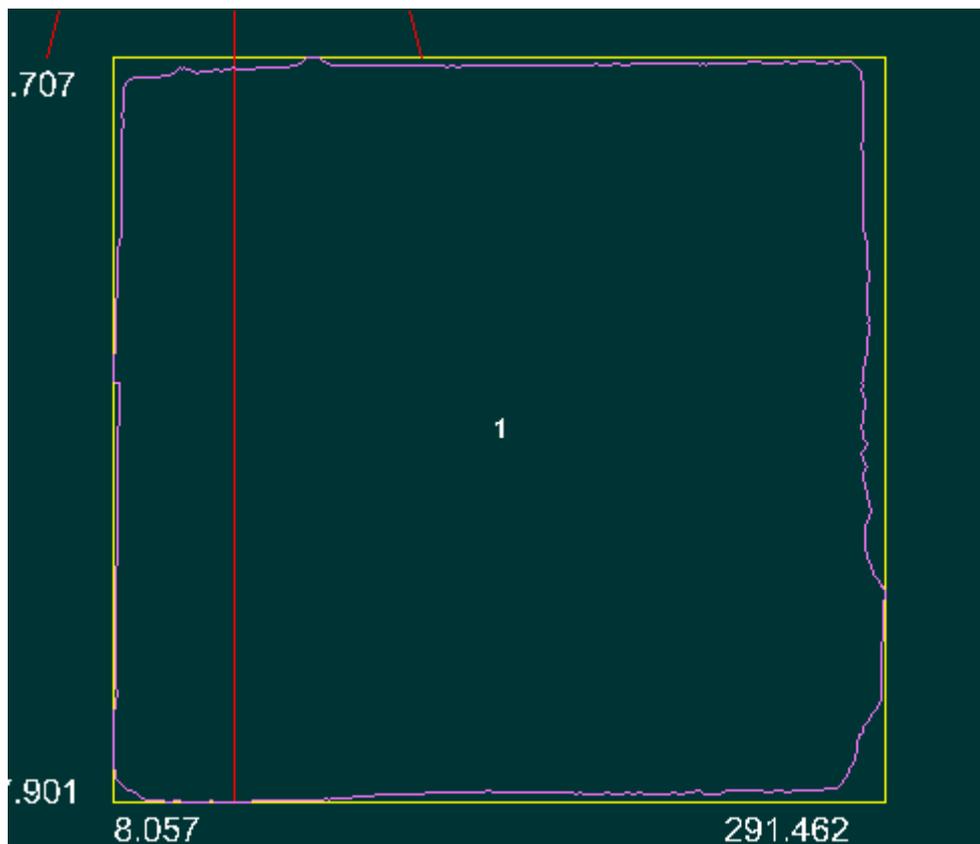


Figura 3 Scansione con il *Cyclone* sul piano XY della sezione trasversale di massima area del concio

Si è comandato alla sonda il moto all'interno del rettangolo giallo di figura 3 e tra due quote Z tali da contenere 40 millimetri di spessore del nostro oggetto. Il risultato della scansione 3D, eseguita accumulando fette in YZ lungo la direzione di accrescimento X è riportato in figura 4.

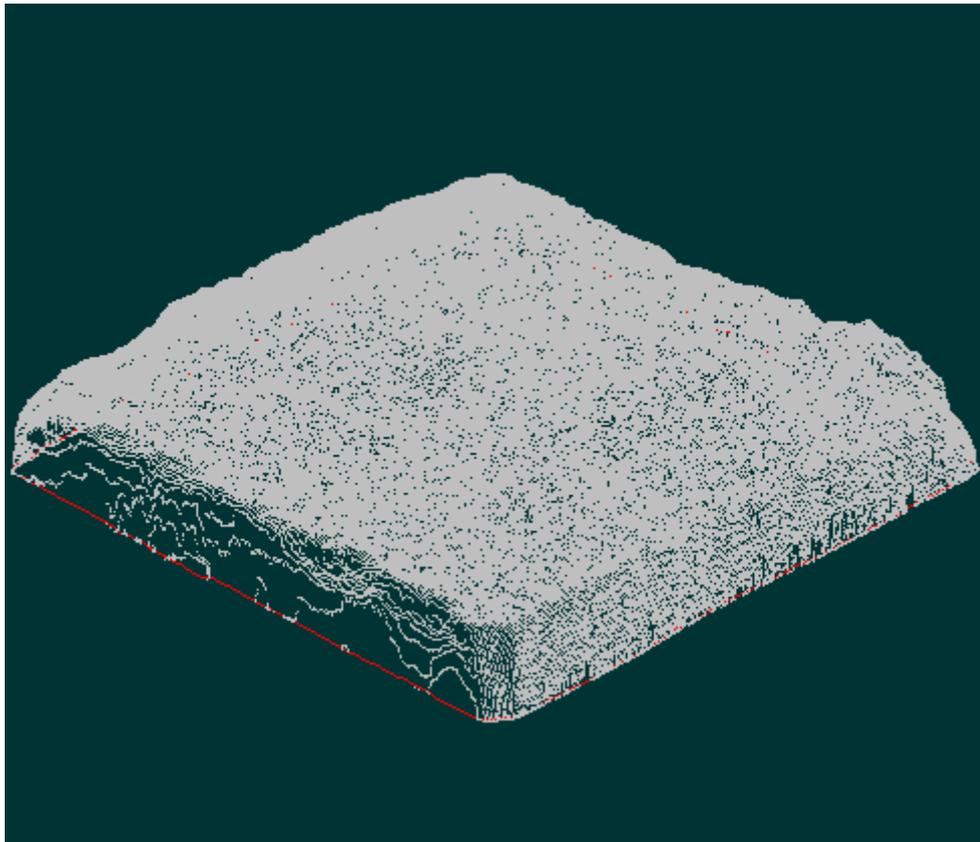


Figura 4 Nuvola catturata al termine dell'esecuzione del profilo tridimensionale

A questo punto tenendo presente delle osservazioni fatte alla fine della sezione 4.2.2 si è esportato il concio come *shell* STL.

5.2 Rilievo con la *Pix-30*

- Concio parte 1:
Tempo di scansione: 18 h e 45 min
Numero di punti: 54385
Risoluzione: 1 mm
- Concio parte 2:
Tempo di scansione: 12 h e 25 min
Numero di punti: 37877
Risoluzione: 1 mm

Il rilievo del concio in una sola operazione di scansione non è stato possibile, ed è stata perciò divisa l'operazione di acquisizione in due fasi. Al termine di esse si sono registrate le nuvole di punti (realizzate con opportuna

sovrapposizione per garantire l'allineamento tra punti omologhi tra le due *shell*, vedi figure 5 e 6) in *Rapidform*.

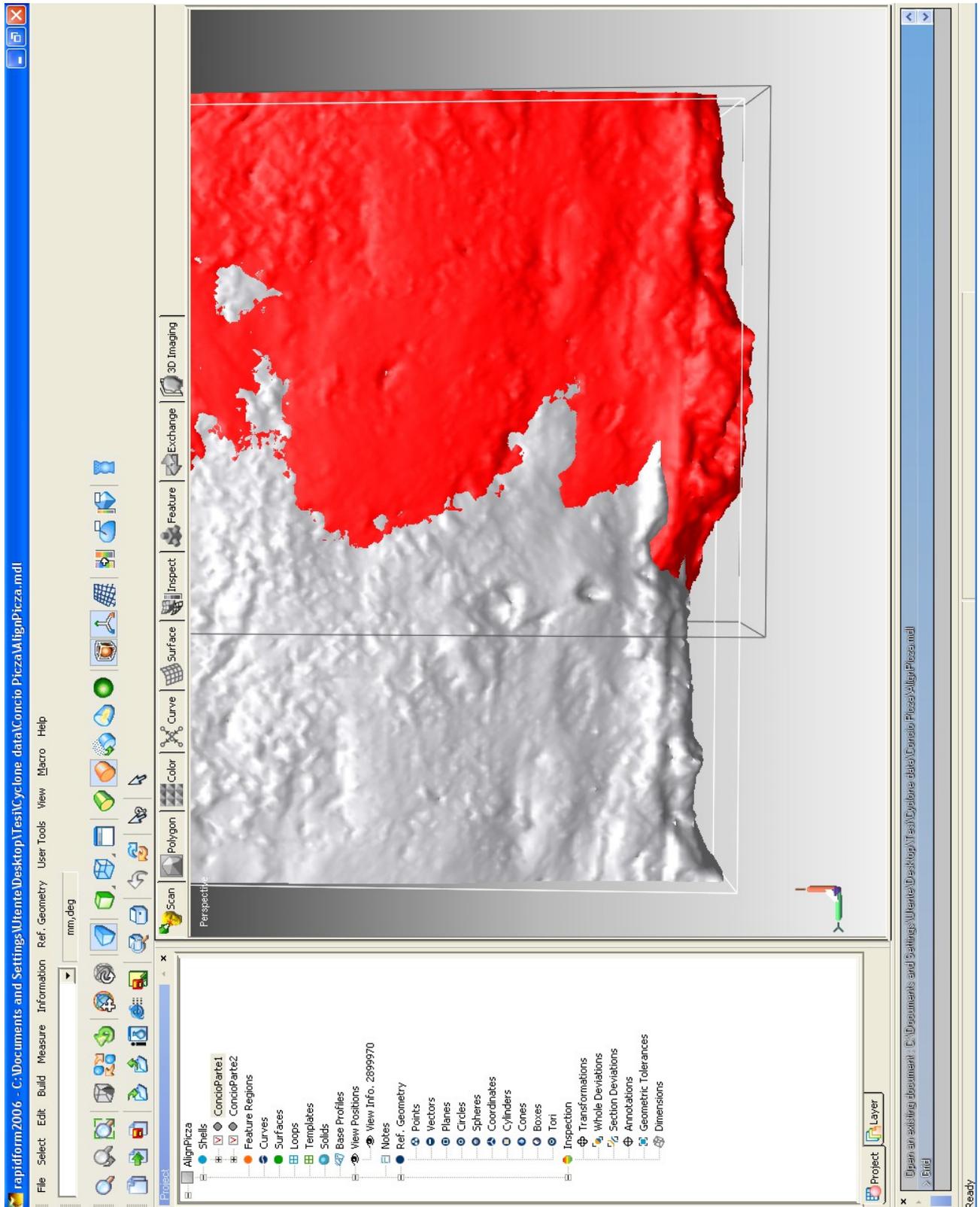


Figura 5 Fase precedente la sovrapposizione tra *shell*; in essa è visibile in modo chiaro la porzione di sovrapposizione su ciascuna delle *shell* (*Rapidform*)

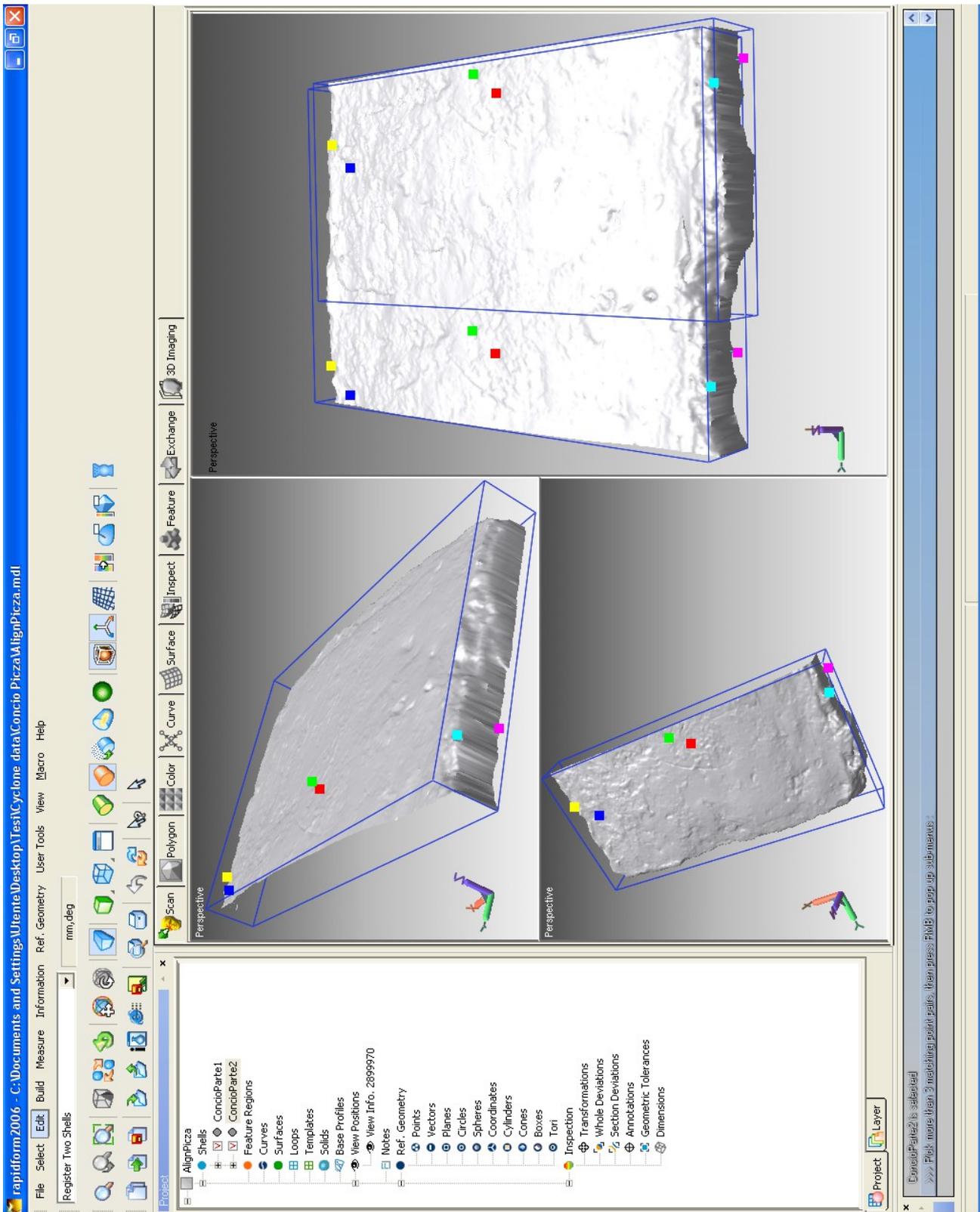


Figura 6 Fase di registrazione tra le shell, in Rapidform

In figura 7 è riportato il risultato della registrazione; in essa è possibile notare la porzione di sovrapposizione, in virtù della maggiore concentrazione di punti.

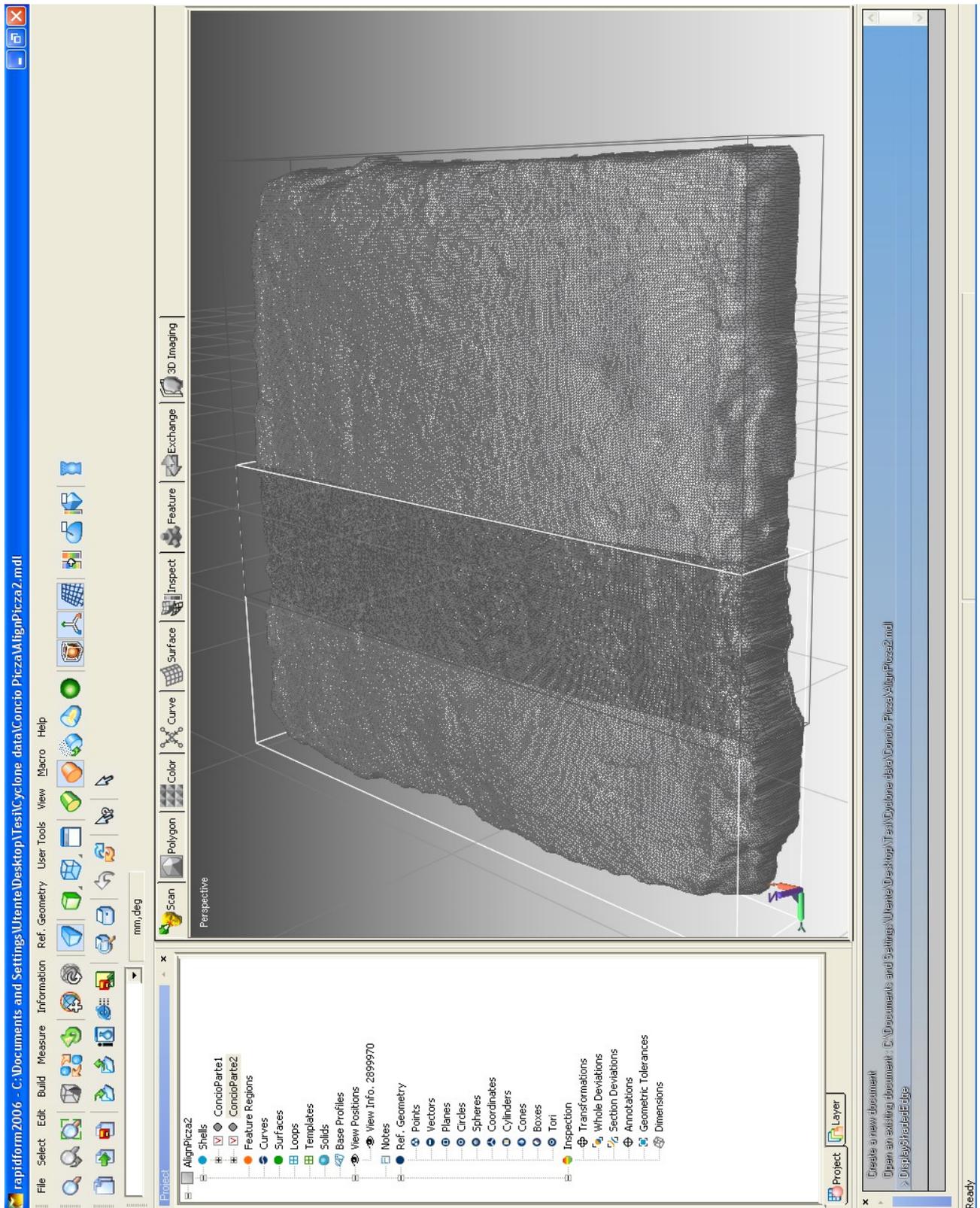


Figura 7 Risultato della registrazione tra le shell (Rapidform)

5.3 *Shell deviation* tra le due nuvole e analisi dei risultati

In questa sezione sono state registrate le due nuvole di punti ed è stata valutata la deviazione tra le *shell* ottenute da ciascuna delle due strumentazioni (figura 8).

In rapida sintesi, si può affermare che entrambe le scansioni sono di ottima qualità e permettono di riconoscere i sottili graffiti presenti. Tuttavia, la modalità di acquisizione della *Pix-30* fornisce una nitidezza di dettaglio che appare superiore a quella del *Cyclone*.

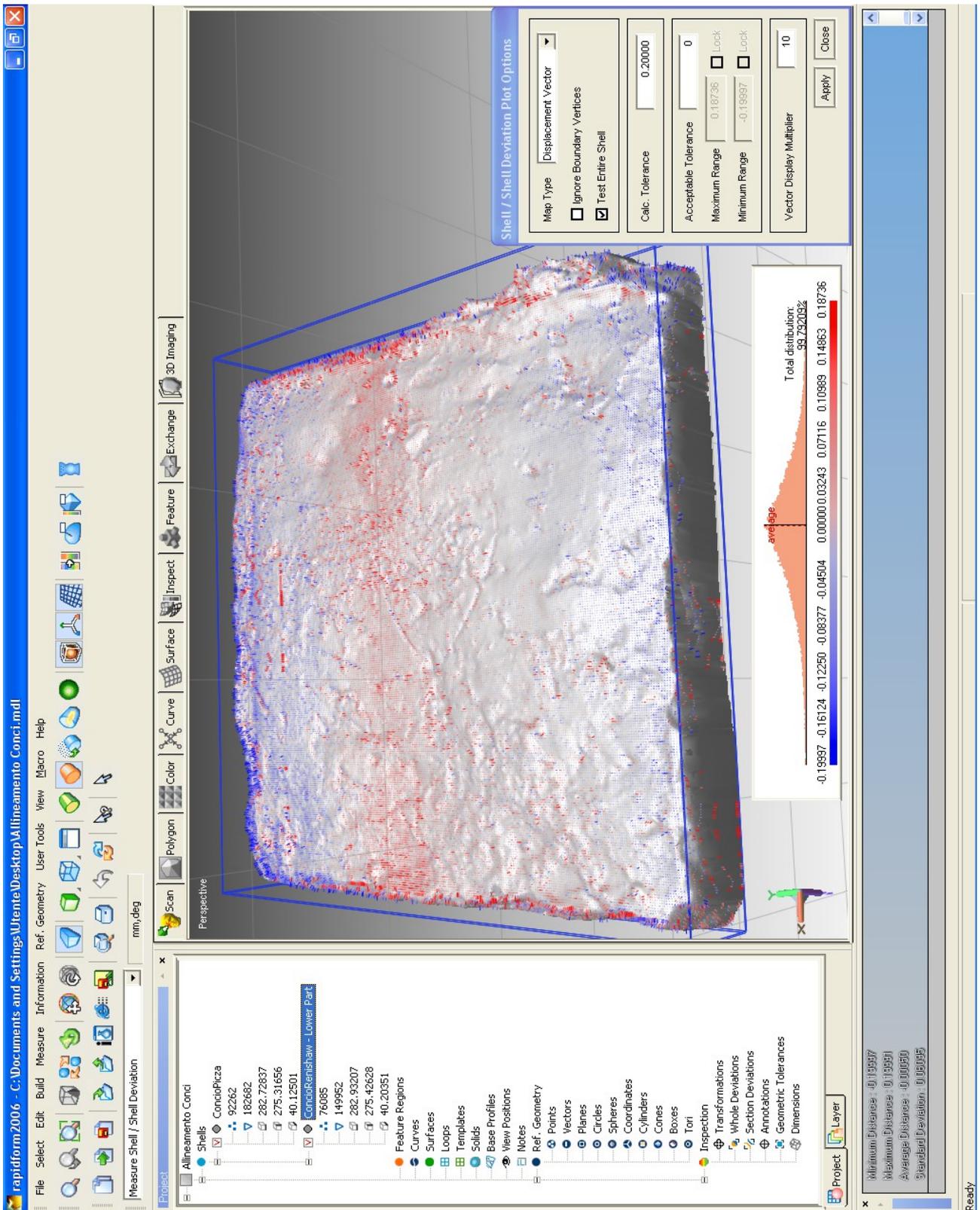


Figura 8 Shell deviation (Rapidform)

CAPITOLO 6

Conclusioni e prospettive

6.0 Alcune considerazioni finali

Una prima considerazione che si può fare guardando ai risultati delle acquisizioni con le due strumentazioni riguarda il tempo di scansione; esso è risultato con la *Pix-30* sensibilmente maggiore rispetto alla scansione realizzata con il *Cyclone* sulla sfera campione. A parità di risoluzione di 0.05 mm il *Cyclone* ha impiegato solo 3 ore, rispetto al tempo di 81 ore della *Pix-30*, che è circa 30 volte più lungo.

Un'altra importante osservazione è relativa al numero di punti catturati nello stesso tipo di prova dalle due strumentazioni, infatti a parità di risoluzione tale numero risulta confrontabile; si parla di 792903 punti acquisiti con il *Cyclone* rispetto agli 812287 punti della *Pix-30*.

Un altro aspetto interessante è che per tale tipo di prova al 99.5 % della distribuzione di probabilità calcolata in *Rapidform* si possono confrontare i valori di precisione e accuratezza minima e massima.

L'accuratezza della *Pix-30* risulta compresa tra -0.27 mm e 0.27 mm con una precisione di 0.12 mm, rispetto al campo di accuratezza del *Cyclone* di [-0.04 mm, 0.04 mm], con una precisione di 0.016 mm.

Pertanto, la prova realizzata con la *Pix-30* è risultata circa 7 volte meno accurata e circa 8 volte meno precisa di quella eseguita col *Cyclone*. Questo implica per la *Pix-30* una più elevata dispersione dei dati rispetto al valore medio.

Comunque, va ribadito che la *Pix-30* può essere utilizzata anche per oggetti la cui superficie presenti caratteristiche di grande "delicatezza" e/o deformabilità.

Infine, si mette in evidenza che per ottenere una valutazione metrologica completa occorrerebbe esaminare più oggetti di

riferimento e per ciascuno condurre più serie di misure. Pertanto, si auspica che tali sviluppi possano essere portati avanti in un successivo studio.

Bibliografia

- [1] G. Guidi, M. Russo, J. A. Beraldin, 2010, *Acquisizione 3D e modellazione poligonale*, Milano: McGraw-Hill.
- [2] D. Bennardi, R. Furferi, 2007, *Il restauro virtuale tra ideologia e metodologia*, Firenze: Edifir.
- [3] Georgia tech invention studio, *Next engine user's guide*, 29 Nov 2010. [In rete] su <http://www.inventionstudio.gatech.edu/wp-content/uploads/NextEngineManual.pdf> consultato il 2/3/2012, ore 17.09.
- [4] A.M. Compagno, *Studio e progettazione di un intervento di integrazione su una statua mediante tecniche di ingegneria inversa e materiali a memoria di forma*, Tesi di laurea specialistica in ingegneria aerospaziale, a.a. 2009/2010 Sessione I, Seconda Facoltà di Ingegneria con sede a Cesena, Università degli Studi di Bologna.
- [5] M. Fantini, *Strumenti e metodi per la progettazione industriale applicati alla conservazione e valorizzazione dei beni culturali*, Tesi di dottorato discussa nel 2007, Università degli Studi di Bologna. [In rete] su <http://amsdottorato.cib.unibo.it/140/> consultato il 12/3/2012 ore 9.23.
- [6] D. Ferrari, 2005, *Qualità nella misurazione. Introduzione alla metrologia e guida applicativa*, Milano: FrancoAngeli.
- [7] Bureau international des poids et mesures, *International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms*, 2012, 3rd edition. [In rete] su http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf consultato il 20/3/2012, ore 19.38.

- [8] E. O. Doebelin, (a cura di) A. Cigada e M. Gasparetto, 2008, *Strumenti e metodi di misura*, 2^a edizione, Milano: McGraw-Hill.
- [9] Center for Astrophysics Harvard - Smithsonian. [In rete] su <http://www.cfa.harvard.edu/ce/facilities/qalab.html> consultato il 26/3/2012, ore 13.58.
- [10] Renishaw apply innovation, *Brochure: Stili di precisione*. [In rete] su <http://www.renishaw.it/it/stili-per-sonde-a-contatto--6333> consultato il 28/3/2012, ore 14.16.
- [11] Nikon Metrology NV. [In rete] su [http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Laser-Scanning/High-accuracy-scanning/HN-6060-Multi-sensor-metrology-systems/\(key_features\)](http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Laser-Scanning/High-accuracy-scanning/HN-6060-Multi-sensor-metrology-systems/(key_features)) consultato il 2/4/2012, ore 11.54.
- [12] M. Rossi, M. Mandelli (direzione e coordinamento), A. Riello (presentazione), 2002, *Manuale delle macchine utensili*, Milano: Tecniche nuove.
- [13] Renishaw apply innovation. [In rete] su [http://resources.renishaw.com/details/RMP600\(116421\)\(29641\)](http://resources.renishaw.com/details/RMP600(116421)(29641)) consultato il 2/4/2012, ore 15.27.
- [14] A. Pizzol, *Taratura di bracci articolati di misura che integrino un sistema di scansione non a contatto*, Tesi di dottorato discussa nel 2010, Università degli Studi di Padova. [In rete] su <http://paduaresearch.cab.unipd.it/2979> consultato il 5/4/2012 ore 16.36.
- [15] Renishaw apply innovation, *Brochure: perché scegliere rengage*. [In rete] su [http://resources.renishaw.com/details/Brochure%3a+Perch%C3%A9+scegliere+RENGAGE%E2%84%A2%3f\(124009\)\(34876\)](http://resources.renishaw.com/details/Brochure%3a+Perch%C3%A9+scegliere+RENGAGE%E2%84%A2%3f(124009)(34876))

consultato il 7/4/2012, ore 19.51.

- [16] R. Suzzani (direzione e coordinamento), A. Maggi (presentazione), 2002, *Manuale dello stampista*, 2^a edizione, Milano: Tecniche nuove.
- [17] Renishaw apply innovation, *Cyclone installation and maintenance guide*. [In rete] su [http://resources.renishaw.com/en/details/Cyclone+installation+and+maintenance+guide\(7428\)](http://resources.renishaw.com/en/details/Cyclone+installation+and+maintenance+guide(7428)) consultato il 9/4/2012, ore 22.20.
- [18] Renishaw apply innovation, *Cyclone data sheet*. [In rete] su [http://resources.renishaw.com/en/details/Cyclone+data+sheet\(7562\)](http://resources.renishaw.com/en/details/Cyclone+data+sheet(7562)) consultato il 11/4/2012, ore 11.01.
- [19] Roland, *Specifiche scanner 3D modelli Pix-30/Pix-4*. [In rete] su http://www.rolanddg.it/upload_area/files/ROLAND%20dp_PIX30_4_ita.pdf consultato il 11/4/2012, ore 11.13.