



**Politecnico
di Torino**

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Controllo delle tolleranze di forma con lettura diretta delle quote 3D da MBD.
Ciclo di misura di rotondità.**

Relatore:

Prof. Stefano Tornincasa

Candidato:

Rocco Puopolo s275748

Correlatore:

Ing. Davide Serra

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

SOMMARIO

L'elaborato si colloca nell'ambito del Disegno Funzionale con riferimento al sistema ISO "Geometric Product Specification" (GPS).

L'utilizzo del software Solidworks ha consentito la realizzazione del modello CAD di un componente meccanico e la quotatura dello stesso mediante MBD (Model Based Definition). La misura della controparte reale del modello è stata eseguita tramite una macchina di misura a coordinate. L'analisi delle caratteristiche del componente è stata effettuata attraverso due metodologie: misura per punti e misura in scansione. I dati acquisiti sono stati poi elaborati attraverso il software di misura PC-DMIS e sono stati poi applicati il filtro gaussiano e il filtro sigma per valutarne l'effetto sui risultati finali. L'applicazione del filtro gaussiano consente di separare l'errore di forma dalle irregolarità della superficie dovute alle caratteristiche di rugosità del pezzo. La definizione di un coefficiente moltiplicativo della deviazione standard consente di imporre la selettività del filtro per rimuovere i punti isolati.

I risultati delle misure sono fortemente influenzati dalla scelta dell'algoritmo per la costruzione del cerchio di riferimento.

Nell'ottica di minimizzare il tempo di misurazione garantendo un'elevata qualità della misura, i risultati della misura in scansione mostrano che il valore ottimale di velocità è pari a 40 mm/s.

Indice

1	Il Disegno Funzionale	1
1.1	Le norme ISO	4
1.1.1	Il principio di indipendenza	4
1.2	Classificazione delle tolleranze geometriche	6
1.2.1	Le tolleranze di forma	6
1.2.2	La tolleranza di rotondità (o circolarità)	7
1.2.3	La tolleranza di cilindricità	13
2	Applicazione circolarità a un albero	16
3	La metrologia a coordinate	18
3.1	Errori nelle misurazioni	19
3.1.1	Il sistema di conferma metrologica	19
3.1.2	Compensazione software degli errori geometrici	20
3.2	Il sistema a coordinate	22
3.3	Caratteristiche costruttive di una CMM	23
4	Tastatori e qualifica	24
4.1	Presenza punto	25
4.2	Anisotropia	27
4.3	Qualifica tastatore in PC-DMIS	28
5	Misura per punti	30
5.1	Determinazione del cerchio di minima zona	31
5.1.1	Determinazione del cerchio di minima zona basata sul minimo cerchio circoscritto	32
5.1.2	Determinazione del cerchio di minima zona basata sul cerchio dei minimi quadrati	36
5.2	Risultati della misura	38
5.3	Cerchio dei minimi quadrati	41
5.4	Rimozione punti anomali	42
5.4.1	Coefficiente moltiplicativo della deviazione standard	42
6	Il filtraggio	45
6.1	I filtri per la rotondità	46
6.2	Filtri lineari	46
6.2.1	Filtraggio usando Fourier	47
6.2.2	Il filtro gaussiano	48
6.2.3	Effetti indesiderati nell'applicazione dei filtri gaussiani	49
6.3	Specifiche del filtro nei disegni	50

7	Misura in scansione	51
7.1	Variazione dei parametri di scansione	52
8	Misura della cilindricità	57
9	Conclusioni	60
A	Determinazione cerchio dei minimi quadrati	62
B	Calcolo deviazioni rispetto ai cerchi di riferimento: misura per punti	64

INTRODUZIONE

Il componente meccanico in esame è un albero il cui modello CAD e la relativa quotatura MBD sono stati realizzati tramite Solidworks. Le misure sono state ottenute con la macchina “GLOBAL S” della Hexagon durante l’attività di tirocinio.

L’obiettivo è la valutazione dell’errore di circolarità al variare dei parametri di misura. Si intende comprendere come il numero di punti rilevato e la velocità di avanzamento del tastatore influenzino la qualità delle misure effettuate. Inoltre, si analizzano gli effetti degli algoritmi utilizzati per la costruzione del cerchio di riferimento sulla stima dell’errore misurato. In questo modo si evidenzia come le indicazioni nel disegno influenzino le modalità con cui i dati rilevati vengono elaborati.

La formulazione matematica dei diversi algoritmi risulta oggetto di studio di questo lavoro. Vengono presentate diverse metodologie per la definizione del cerchio di minima zona, basate su approcci geometrici e sulla definizione di problemi di ottimizzazione. I diversi metodi sono stati applicati al set di dati ottenuto con la misura per punti al fine di verificare che i risultati fossero coerenti con quelli forniti dal software di misura PC-DMIS. I risultati della misura in scansione sono stati elaborati attraverso l’applicazione di un filtro gaussiano. È stata evidenziata l’importanza di un valore adeguato di frequenza di taglio, da scegliere in funzione del rapporto fra il diametro della punta del tastatore e il diametro della parte misurata. In questo senso è fondamentale seguire le indicazioni della normativa per garantire la massima qualità e affidabilità delle misure effettuate.

Sono state condotte delle misure di cilindricità. L’obiettivo era dimostrare che, data la lunghezza limitata della parte in esame, l’errore di rettilineità dell’asse fosse trascurabile e che non ci fosse una variazione significativa nella stima dell’errore di circolarità delle diverse sezioni esaminate per studiare la feature in esame. L’utilizzo del software QUINDOS ha permesso l’elaborazione di grafici topografici per avere una rappresentazione tridimensionale dell’errore di forma della parte.

1 Il Disegno Funzionale

Per eliminare le incongruenze e le ridondanze del passato, l'ISO nel 1995 realizza il Linguaggio Standard per la "Specificazione Geometrica dei Prodotti" (GPS). L'obiettivo è la rifondazione dell'edificio normativo che riguarda specifiche dimensionali e geometriche di prodotto. Si mettono a confronto, per la prima volta negli standard, i progettisti con i metrologi. L'utilizzo dei sistemi CAD consente la creazione di geometrie perfette, ma i componenti reali presentano imperfezioni dimensionali e geometriche originate dalle condizioni di lavoro delle usuali lavorazioni meccaniche. Gli errori introdotti nel processo di produzione causano uno scostamento fra i pezzi e l'idea originale del progettista. È fondamentale specificare nel disegno i limiti entro i quali tali errori risultano accettabili e ciò è strettamente legato alla funzione che il pezzo deve assolvere. Diventa necessario adottare un linguaggio simbolico, che, in maniera completa e senza ambiguità, definisca quali sono le variazioni ammissibili affinché funzionalità e assemblaggio risultino garantiti.

L'approccio garantisce al progettista strumenti più efficaci per la definizione dei requisiti funzionali attesi con la massima tolleranza consentita e il processo di ispezione diventa scientificamente controllabile. Infatti, il disegno ha il duplice ruolo di modello del pezzo e mezzo di comunicazione essenziale per l'integrazione delle varie fasi del processo produttivo.

È possibile affermare che ogni componente esiste in tre domini distinti:

- Disegno;
- Fabbricazione;
- Verifica.

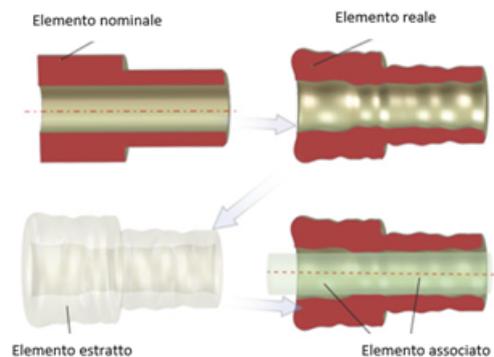


Figura 1: Domini del componente

Nel processo di progettazione viene definita la geometria nominale, mentre nel processo di fabbricazione il pezzo risultante è quello reale. La fase di controllo estrae la geometria del pezzo fisico per elaborare gli elementi associati alle superfici e stimare il valore della misura di interesse. In fase di progettazione gli obiettivi sono di **ricercare**, **definire** e **codificare** la funzione di ciascun componente. Occorre evitare l'introduzione di prescrizioni restrittive non necessarie, che potrebbero comportare complicazioni nell'interpretazione del disegno e nella realizzazione dell'oggetto, andando così in direzione contraria rispetto al miglioramento ipotizzato. I criteri per la definizione delle tolleranze normalmente prevedono il contenimento dei costi di fabbricazione e la piena funzionalità del componente, nonostante le possibili deviazioni dalla forma ideale. Le specifiche geometriche dei prodotti (GPS) stabiliscono dei requisiti sulle geometrie dei pezzi relativi a tolleranze dimensionali, geometriche e sullo stato di finitura superficiale del pezzo. Il linguaggio GPS, costituito da simboli usati per il controllo delle tolleranze, consente di avere maggiore flessibilità in fase produttiva e assicura il controllo dei costi. Inoltre, viene assicurata una comunicazione non ambigua non solo tra progettazione, produzione e controllo qualità, ma anche con il cliente e il fornitore. Questo linguaggio si propone di codificare la geometria reale imperfetta in modo perfetto, localizzando e orientando le zone di tolleranze con una specifica dei limiti in modo che il pezzo possa funzionare. L'uso dei simboli presenta i seguenti vantaggi:

- Il simbolo ha un significato universale, superando le barriere costituite dai linguaggi nazionali;
- Il simbolo ha un significato univoco.

“Il concetto fondamentale della **progettazione funzionale** è che gli elementi reali del pezzo devono trovarsi in un intorno della loro localizzazione teorica, cioè di quella che hanno nel pezzo ideale“. Il disegno funzionale è la procedura che bisogna adottare per definire ciascuna caratteristica del pezzo completamente, in termini di dimensione, forma, posizione e orientazione. I CAD da soli sono insufficienti per una documentazione efficace del prodotto industriale. Infatti, per una descrizione rigorosa della parte, non bastano solo le dimensioni indicate nel disegno, ma bisogna specificare l'errore ammissibile in termini di dimensioni, forma, posizione e orientazione. Il CAD deve essere dunque integrato con uno strumento di disegno funzionale. Il disegno funzionale è un mezzo per specificare in un disegno le relazioni geometriche e funzionali delle caratteristiche del pezzo e indica come i particolari devono essere controllati e misurati.

La non applicazione del disegno funzionale porta a una documentazione tecnica incompleta e ambigua; aumenta la probabilità di avere costi di produzione e ispezione più elevati e non sono da sottovalutare i rischi associati a possibili controversie legali. Inoltre, non è garantito il montaggio, la funzionalità e le prestazioni risultano scadenti; il controllo delle parti non è un processo univoco. Una specifica ambigua potrebbe portare a scartare un pezzo perché non conforme alle tolleranze prescritte nel disegno anche se in pratica accettabile e funzionante e viceversa.

Obiettivo del Geometrical Product Specifications è lo sviluppo di un nuovo schema di gestione delle tolleranze geometriche, al fine di ottenere una migliore correlazione tra i requisiti funzionali, le specifiche geometriche e le relative procedure di controllo. Applicando correttamente il sistema GPS si assicura ai prodotti le seguenti proprietà:

- *Perfetta intercambiabilità delle parti da accoppiare in fase di montaggio;*
- *Riduzione dei rischi legati a una errata interpretazione dei disegni. I requisiti funzionali sono espressi in maniera completa nella documentazione tecnica;*
- *Integrazione con i sistemi CAD, con maggiore completezza delle informazioni dei modelli realizzati;*
- *Codifica completa delle caratteristiche dei componenti, univocità delle informazioni e piena integrazione delle diverse fasi del processo produttivo. Viene migliorata la comunicazione interna (progettazione, produzione, qualità) ed esterna (clienti, fornitori) attraverso una riduzione dell'ambiguità nell'indicazione dei requisiti dimensionali e geometrici;*
- *Vengono ridotti gli scarti legati a incertezza nella specificazione dei requisiti funzionali;*
- *Le operazioni di controllo per la verifica delle prescrizioni geometriche e dimensionali vengono migliorate, riducendo così il rischio di contestazioni.*

1.1 Le norme ISO

La ISO 14638 introduce un sistema matriciale, che contiene tutte le norme GPS, composto da:

- **Righe:** contengono proprietà geometriche;
- **Colonne:** rappresentano i diversi ambienti di specifica e verifica, intervallati da un ambiente intermedio in cui viene svolto un confronto tra le due parti e vengono specificate le regole decisionali per effettuare al meglio la verifica del componente.

Le norme GPS UNI EN ISO 14638 vengono suddivise in:

- **Fondamentali:** esprimono regole e procedure fondamentali per tutto il sistema e occupano tutte le caselle della matrice;
- **Generali:** investono una o più righe e una o più colonne, come le ISO 1101 per le tolleranze di forma, orientazione e localizzazione;
- **Complementari:** specializzate per specifici processi di lavorazione o specifici elementi di macchine.

1.1.1 Il principio di indipendenza

La norma UNI ISO 8015 introduce il principio di indipendenza, secondo il quale “ciascuna prescrizione dimensionale o geometrica specificata su un disegno deve essere rispettata in sé stessa in modo indipendente, salvo non sia prescritta sul disegno una relazione particolare. Pertanto, in mancanza di specifiche indicazioni, le tolleranze geometriche si applicano senza tenere conto delle dimensioni dell’elemento, e le due prescrizioni (dimensionali e geometriche) devono essere trattate come esigenze tra loro indipendenti”. Questo significa che la tolleranza lineare limita soltanto le dimensioni reali locali (misurate tra due punti) di un elemento, ma non i suoi errori di forma. Le tolleranze geometriche si riferiscono invece allo scostamento di un elemento rispetto alla sua forma, orientamento o posizione teoricamente esatti. Le tolleranze geometriche si applicano indipendentemente dalle dimensioni locali reali dei singoli elementi. Di conseguenza, devono essere valutate con tempi e operazioni diverse rispetto a quelle dimensionali.

Prima del 2011, in assenza di richiamo alla ISO 8015, il default era costituito dal principio di involuppo, secondo il quale “non deve essere superato l’involuppo della forma perfetta corrispondente alla condizione di massimo materiale di un elemento” (forma perfetta al massimo materiale). Dopo l’introduzione della norma ISO 8015: 2011 il principio di indipendenza è diventato un

default per le ISO. Ciò significa che le deviazioni di forma non sono più limitate dalle tolleranze dimensionali. L'intenzione di utilizzare il principio di involuppo deve essere specificata nel disegno attraverso il simbolo cerchiato E.

Secondo la norma ISO 8015 esistono altri importanti principi, come il **principio di invocazione**: basta inserire in un disegno anche un solo riferimento del GPS per invocare l'intero sistema GPS. Poiché molti simboli GPS sono identici ai simboli GD&T si raccomanda di esplicitare nel cartiglio "ISO 8015" o "Tolleranze UNI EN ISO 8015".

Quando si utilizzano disegni precedenti al 2011 è possibile scegliere fra due possibili alternative:

- Tornare al principio di involuppo inserendo nel disegno ISO una E cerchiata vicino ad una singola quota;
- Scrivere sopra il cartiglio "Size ISO 14405 E (cerchiata)", tornando così al principio di involuppo per tutto il disegno.

Lo standard ISO viene definito come CMM friendly. Infatti, mentre la teoria delle ASME si basa su calibri funzionali, quella ISO si basa sul controllo mediante macchine di misura. Come già detto il default è costituito dal principio di indipendenza e il numero di standard è pari a circa 150. Mentre le ASME sono molto stabili, le ISO vedono cambiamenti ogni anno con l'introduzione di nuovi concetti e idee.

1.2 Classificazione delle tolleranze geometriche

Le tolleranze geometriche possono essere divise in quattro categorie: forma, orientamento, posizione e oscillazione.

Tipo	Riferimenti	Caratteristica geometrica	Simbolo
Forma	Non associabili	Rettilineità	—
		Planarità	
		Circolarità	○
		Cilindricità	
	Associabili	Forma di un profilo	
		Forma di una superficie	
Orientamento	Associabili	Parallelismo	
		Perpendicolarità	
		Inclinazione	
Posizione		Localizzazione	
		Concentricità	
Oscillazione		Simmetria	
	Oscillazione circolare		
	Oscillazione totale		

Tabella 1: Classificazione tolleranze

1.2.1 Le tolleranze di forma

Le tolleranze di forma stabiliscono i limiti di variabilità di un elemento geometrico rispetto alla forma ideale riportata nel disegno. Le tolleranze non associabili non si riferiscono ad altre caratteristiche della parte, prese come datum. Le tolleranze non associabili si applicano senza un sistema di riferimento esplicito, ma attraverso un riferimento implicito, ovvero la forma nominale della feature. Quando si usa una tolleranza di forma, non bisogna mai richiamare un sistema di riferimento. La metrologia a coordinate consente la valutazione dell'errore di forma di un elemento geometrico reale: è possibile valutare lo scostamento fra i punti del pezzo in esame e i punti della superficie ideale che soddisfano l'equazione matematica associata a quell'elemento geometrico. Il metodo di calcolo che si adotta per la determinazione dell'equazione dell'elemento geometrico in esame comporta risultati diversi in termini di valutazione dell'errore di forma.

1.2.2 La tolleranza di rotondità (o circolarità)

La norma ISO 12181-1 definisce i termini e i concetti relativi alla rotondità. La rotondità è la proprietà di un cerchio. A partire da una feature integrale, che può essere una superficie cilindrica o una generica superficie di rivoluzione, è possibile definire una feature associata il cui asse prende il nome di “asse di rotondità”. Un piano ortogonale a quest’asse, lungo l’estensione della feature di cui si intende misurare la rotondità, prende il nome di “piano di rotondità”. L’intersezione fra la superficie reale del pezzo e il piano di rotondità fornisce la “linea circonferenziale estratta”. L’applicazione di un filtro alla linea circonferenziale estratta porta alla definizione del “profilo di rotondità”. Le deviazioni locali di rotondità rappresentano la distanza tra il profilo di rotondità e un cerchio di riferimento.

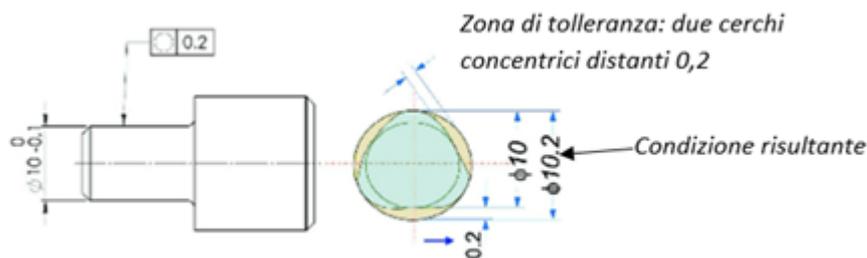


Figura 2: Indicazione e interpretazione della tolleranza di circolarità

Come già specificato, le deviazioni di forma non sono limitate dalle tolleranze dimensionali, che controllano solo le dimensioni locali reali di un elemento (misurate tra due punti), ma non i suoi errori di forma. La condizione risultante rappresenta il limite dimensionale del pezzo dovuto agli effetti combinati delle dimensioni, delle tolleranze dimensionali e di quelle geometriche. Infatti, lo scostamento di circolarità non va confuso con la misurazione del diametro. Oltre ad essere due parametri diversi, richiedono anche metodi di misura differenti. Le cause più comuni degli scostamenti di circolarità del pezzo sono le seguenti:

- Cuscinetti difettosi nelle tavole rotanti o nel mandrino;
- Parti rotanti non correttamente equilibrate;
- Sollecitazioni indesiderate dei sistemi di serraggio;

- Flessioni dell'utensile da taglio o del pezzo in lavorazione;
- Scostamento di rettilineità delle guide di scorrimento della macchina.

"Per le feature assialsimmetriche la circolarità è la proprietà per cui tutti i punti che appartengono all'intersezione tra la feature e un piano euclideo normale all'asse di simmetria sono equidistanti dall'asse di simmetria.

Per le feature sferiche la circolarità è la proprietà per cui tutti i punti che appartengono all'intersezione tra la feature e un piano euclideo passante per il centro della sfera sono equidistanti dal centro della sfera."

La tolleranza di circolarità definisce una zona bidimensionale limitata da due cerchi concentrici la cui distanza radiale è pari alla tolleranza specificata. Nel caso di feature cilindriche, la rotondità si applica alle sezioni trasversali perpendicolari all'asse della feature tollerata. Per le feature sferiche, la rotondità si applica alle sezioni trasversali che includono il centro della sfera. Per quelle superfici di rivoluzione che non sono cilindriche o sferiche la norma afferma che devono essere utilizzate le "direction feature" per specificare come si applica la tolleranza di circolarità. Infatti, uno dei problemi che ci si trova ad affrontare in fase di misura è la direzione di misura dell'errore di circolarità, soprattutto per quanto riguarda i pezzi troncoconici.

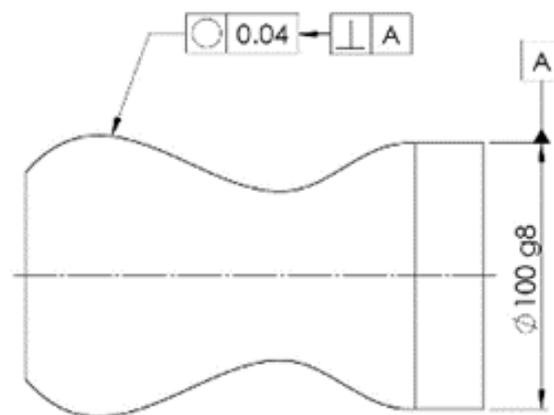


Figura 3: Utilizzo della direction feature

Per quanto riguarda la tolleranza di rotondità valgono le seguenti regole:

- Il controllo si applica a tutte le sezioni trasversali lungo la feature tollerata;
- L'errore di forma può essere più grande di quello dimensionale associato al diametro corrispondente;
- Tutte le dimensioni locali devono rientrare nei limiti di tolleranza dimensionale specificati;
- Nel calcolo dell'accoppiamento si deve tener conto dell'errore di circolarità;
- Si ottiene una Virtual Size di massimo materiale.

Il consiglio è quello di utilizzare una tolleranza minore della metà della tolleranza dimensionale; non è possibile l'applicazione dei modificatori di minimo e massimo materiale. La rotondità si può utilizzare con superfici di forma qualsiasi, a patto che abbiano una sezione circolare. La circolarità si applica solitamente ai cuscinetti e alle sedi degli stessi. Spesso si preferisce utilizzare questa tolleranza al posto della cilindricità, la cui verifica risulta molto costosa.

Per stabilire l'errore di rotondità è necessario stabilire un cerchio di riferimento, ovvero un cerchio associato. La verifica di rotondità, che si basa sull'impiego di macchine di misura CMM, parte dalla linea estratta e associa un cerchio di riferimento. A partire dal cerchio di riferimento vengono quindi definiti due cerchi concentrici in modo da calcolare la grandezza della zona bidimensionale che contiene il cerchio stesso.

Secondo la ISO 12181-1, sono quattro le procedure che possono essere utilizzate per la determinazione del cerchio di riferimento. I metodi di Chebyshev e Gauss hanno entrambi l'obiettivo di trovare il cerchio che meglio approssima i dati rilevati, ma i due criteri adottati sono molto diversi. In entrambi i casi, comunque, l'obiettivo è quello di risolvere un problema di ottimizzazione.

Se non è indicato nessun elemento di specifica, il parametro predefinito è l'intervallo totale di deviazioni, cioè la distanza dalla valle più bassa al picco più alto.

Si utilizzano i seguenti simboli:

- **T**: può essere usato per indicare il range di deviazione complessivo;

- **P**: deve essere usato per indicare l'altezza del picco. La deviazione fra il picco più alto della feature tollerata e la feature di riferimento non deve superare questo valore;
- **V**: deve essere usato per indicare la profondità della valle. La deviazione fra la valle più profonda e la feature di riferimento non deve superare questo valore.

È possibile specificare P e V solo se il riferimento è costituito dal cerchio dei minimi quadrati o da quello di Chebyshev.

- **Cerchio dei minimi quadrati (LSC)**: il cerchio di riferimento dei minimi quadrati è quello in cui la somma delle aree all'interno del cerchio è uguale alla somma delle aree esterne al cerchio, mantenendo una separazione minima. Il metodo consiste nel minimizzare la somma dei quadrati delle differenze tra i dati osservati e i dati teorici.

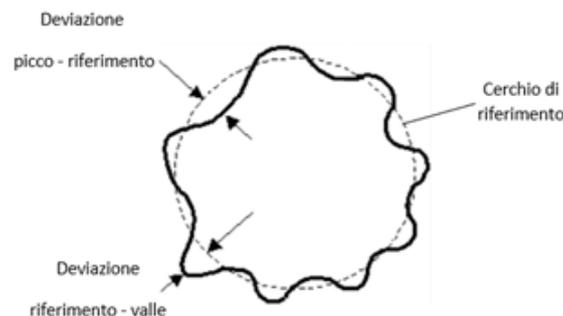


Figura 4: Cerchio dei minimi quadrati

Un cerchio nel piano può essere descritto dalle coordinate del centro (x_0, y_0) e dal raggio r_0 . La distanza d di un punto $p = (x, y)$ da un cerchio definito dai parametri $a = (x_0, y_0, r_0)$ è data da:

$$d = d(x, a) = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{1/2} - r_0 \quad (1.1)$$

Dato un insieme di punti $X = x_i : i = 1, \dots, m$, il cerchio Gaussiano associato (cerchio dei minimi quadrati) si trova risolvendo il seguente problema di ottimizzazione:

$$\min_a \sum_{i=1}^m d^2(x_i, a) \quad (1.2)$$

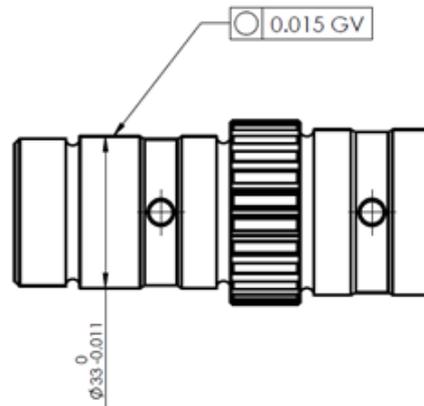


Figura 5: Specifica di circolarità usando il cerchio di riferimento dei minimi quadrati e la deviazione riferimento-valle

- Cerchio di zona minima (Chebyshev):** due cerchi concentrici racchiudono il profilo di rotondità e hanno la minima separazione radiale. Il valore di rotondità è quindi fornito come separazione radiale. Il criterio di ottimizzazione è quello di minimizzare la differenza tra la più grande e la più piccola deviazione:

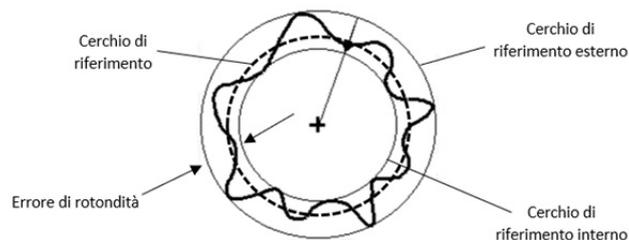


Figura 6: Cerchio di Chebyshev

Dato un set di punti, il cerchio di Chebyshev è definito dalla soluzione del seguente problema:

$$\min_a \max_{i=1, \dots, n} |d(x_i, a)| \quad (1.3)$$

Introducendo il parametro $s = \max_i |d(x_i, a)|$, il problema può essere riformulato come segue:

$$\min_{a, s} s, \text{ con } -s \leq d(x_i, a) \leq s, i = 1, \dots, m \quad (1.4)$$

- **Minimo cerchio circoscritto (MCC):** si tratta del cerchio più piccolo che racchiude interamente il profilo. La rotondità viene in tal caso quantificata come la maggiore deviazione rispetto a questo cerchio:

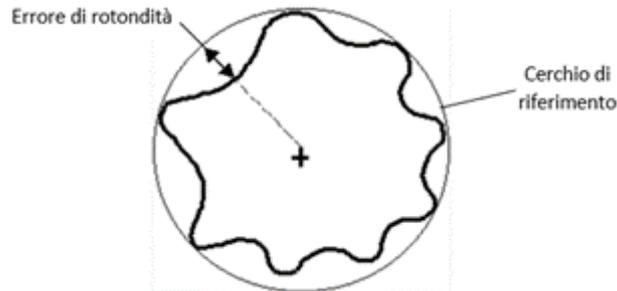


Figura 7: Cerchio minimo circoscritto

- **Massimo cerchio inscritto (MIC):** si tratta del cerchio più grande completamente racchiuso dal profilo. Gli errori vengono quantificati come deviazione radiale massima rispetto a questo cerchio di riferimento.

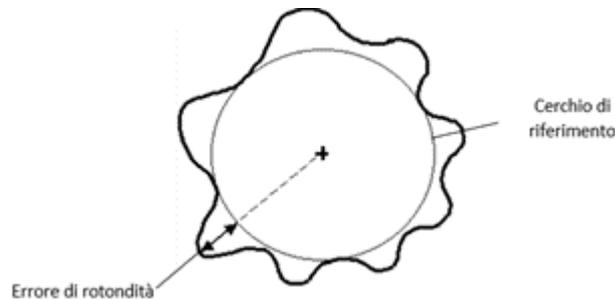


Figura 8: Massimo cerchio inscritto

L'utilizzo di metodologie differenti comporta risultati diversi. In passato, la definizione del cerchio di riferimento era lasciata alla discrezione dell'operatore, che generalmente applicava il default delle GPS, cioè il criterio di zona minima (Chebyshev).

1.2.3 La tolleranza di cilindricità

L'errore di cilindricità riflette la variazione tra un cilindro reale e un cilindro ideale. Nel processo di valutazione della cilindricità sono stati sviluppati diversi metodi e algoritmi per migliorare l'accuratezza e l'affidabilità dei risultati.

La cilindricità è la condizione di una superficie di rivoluzione nella quale tutti i punti di una superficie sono equidistanti da un asse comune.

La tolleranza di cilindricità specifica una zona tridimensionale fra due cilindri coassiali entro i quali la superficie deve trovarsi:



Figura 9: Zona di tolleranza

I due cilindri si estendono per l'intera lunghezza della superficie considerata, creando un bordo cilindrico.

Questa tolleranza controlla la forma di una feature cilindrica per assicurare la rotondità e la rettilineità dell'asse. Può essere vista come una tolleranza di circolarità estesa all'intera lunghezza del cilindro. Mentre la circolarità si applica ad una sola sezione per volta (in quanto la zona di tolleranza è bidimensionale), la cilindricità controlla l'intera superficie e tiene conto anche della rettilineità della feature cilindrica considerata.

Quando una parte deve rispettare sia i requisiti di circolarità e rettilineità lungo l'asse, la cilindricità deve essere richiamata.

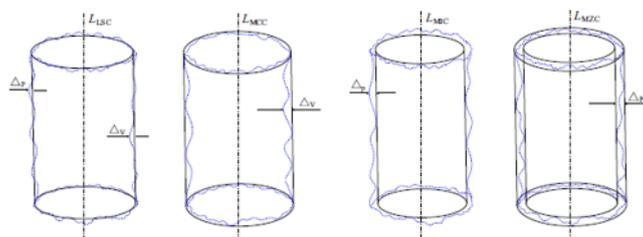
Le parti per le quali la tolleranza di cilindricità viene usata frequentemente sono le seguenti:

- Alberi;
- Perni;
- Guida valvole;
- Cuscinetti e boccole.

Come nel caso della circolarità, è consigliabile scegliere un valore di tolleranza che risulti la metà della tolleranza dimensionale. Quando si valuta la tolleranza di cilindricità, è necessario determinare un cilindro di riferimento, come già visto nel caso della tolleranza di circolarità. Usando una macchina di misura a coordinate, l'ispezione di cilindricità prevede, partendo dalla superficie estratta, l'associazione di un cilindro di riferimento, rispetto al quale vengono definiti i due cilindri coassiali. La norma ISO 12180-1 considera quattro procedure che possono essere usate per la determinazione del cilindro di riferimento:

- Metodo dei cilindri di minima zona (MZ): due cilindri coassiali racchiudono la superficie cilindrica e hanno la minima separazione radiale;
- Cilindro dei minimi quadrati (LS): è il cilindro per il quale la somma dei quadrati delle deviazioni locali è minima;
- Minimo cilindro circoscritto (MC);
- Massimo cilindro inscritto (MI).

Anche in questo caso è possibile definire una deviazione picco-valle, picco-riferimento e riferimento valle attraverso opportuni modificatori.



(a) Deviazione = $\Delta_p + \Delta_v$ (b) Deviazione = Δ_v (c) Deviazione = Δ_p (d) Deviazione = Δ_{pv}

Figura 10: Deviazioni rispetto al cilindro di riferimento

Comparando i vari metodi, il minimo cilindro circoscritto è utilizzato quando si analizza il diametro esterno di un pezzo, mentre il massimo cilindro inscritto è usato per i diametri interni. In generale, il metodo dei minimi quadrati è largamente impiegato, in quanto offre i vantaggi di un modello matematico esplicito e una grande velocità di calcolo, ma questo criterio può essere influenzato dalla presenza di irregolarità superficiali. La soluzione che si ottiene con il criterio di minima zona porta a un errore minore rispetto

agli altri tre metodi, ma ha una complessità computazionale superiore. Ovviamente nella misura della cilindricità, le strategie di misurazione e i metodi di valutazione sono determinanti per il risultato finale.

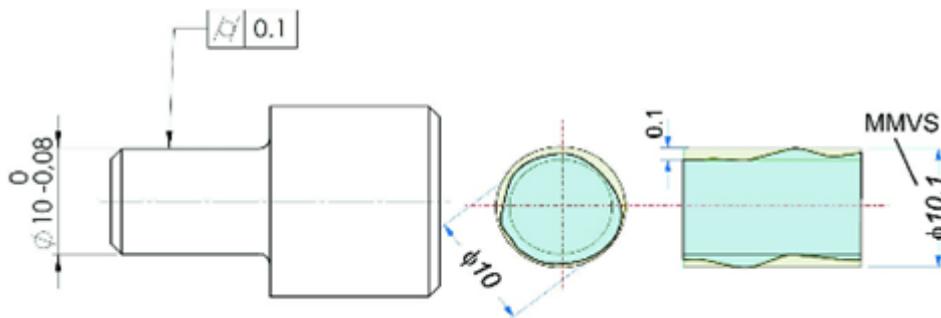
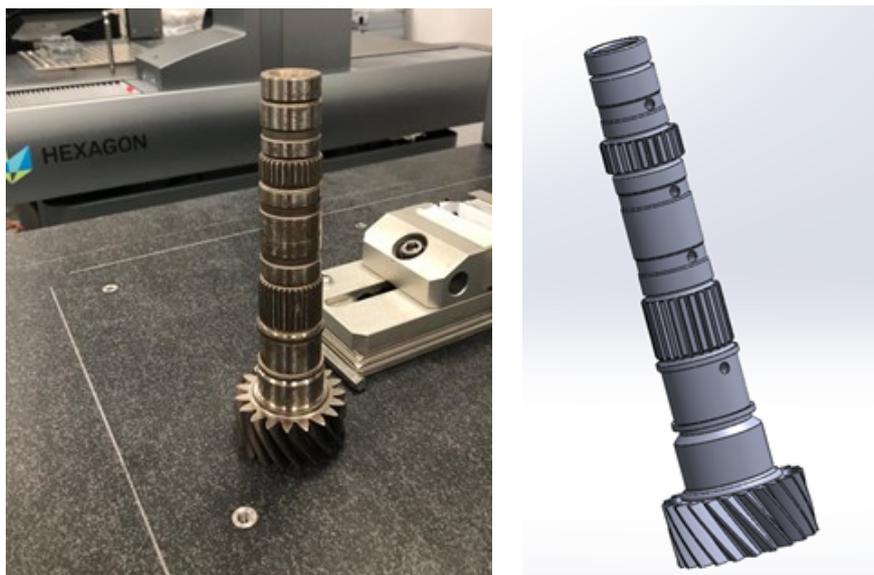


Figura 11: Interpretazione del principio di indipendenza per la tolleranza di cilindricità

2 Applicazione circolarità a un albero

Le misure di circolarità sono state condotte durante l'attività di tirocinio su uno degli alberi presenti nel laboratorio di Hexagon Metrology S.p.A.. Basandosi sui disegni 2D, è stato realizzato un modello dell'albero attraverso il software Solidworks.



(a) Albero misurato in laboratorio (b) Modello albero in Solidworks

Figura 12

Le misure sono state effettuate con la macchina di misura a coordinate Global S di Hexagon:



Figura 13

La parte dell'albero oggetto delle misure è evidenziata in figura:



Figura 14

Si riporta la specifica di circolarità sulla feature esaminata:

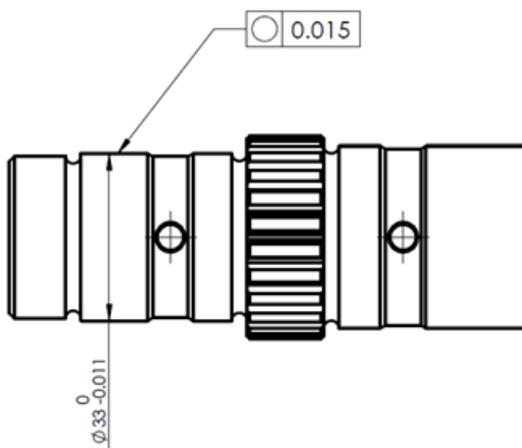


Figura 15

Dopo aver quotato la parte oggetto di studio, il modello è stato importato nel software PC-DMIS prima dell'esecuzione dei cicli di misura di rotondità.

3 La metrologia a coordinate

La misurazione dimensionale è il processo che permette di valutare le dimensioni lineari, angolari, di forma e di relazione tra elementi di particolari tecnici.

L'attività di misurazione è estremamente importante in ambito industriale e richiede livelli di prestazione sempre maggiori. La metrologia gioca un ruolo chiave nel garantire la qualità e l'affidabilità dei prodotti. Bisogna far affidamento su quei sistemi di misura, che automatizzando il processo di misurazione, riducano tempi e costi delle attività di misurazione. Le Macchine di Misura a Coordinate (CMM) rispondono a queste esigenze e sono oggi molto diffuse nell'ambito del Controllo Qualità per operazioni di controllo e di verifica delle tolleranze dimensionali e geometriche. Una CMM è un sistema di misurazione in grado di spostare un sistema tastatore e di determinare coordinate spaziali sulla superficie di un pezzo (UNI EN ISO 10360-1:2005). La scansione con le macchine di misura a coordinate garantisce una maggiore produttività grazie ad un'acquisizione dati più veloce e fornisce maggiori informazioni sulle caratteristiche geometriche.

Obiettivi della metrologia sono:

- Assicurare l'uniformità delle misurazioni;
- Assicurare ispezioni economicamente convenienti;
- Calibrare gli strumenti di misura regolarmente in modo da garantire l'accuratezza delle misurazioni;
- Indagare ed eliminare le cause di errore nella misura.

3.1 Errori nelle misurazioni

È importante evidenziare che le misurazioni ottenute non sono completamente accurate, in quanto ad esse è associata un'incertezza. L'incertezza di misura caratterizza la dispersione dei valori che possono essere ragionevolmente attribuiti ad un misurando ed indica la qualità della misura.

Diversi sono i contributi di incertezza:

- Strumento di misura;
- Operatore;
- Ambiente di misura: variazione delle condizioni ambientali;
- Procedura di misurazione;
- Impostazione;
- Misurando: errori di forma del pezzo o limiti di variazione dovuti alla non perfetta definizione del misurando.

3.1.1 Il sistema di conferma metrologica

La conferma metrologica è costituita da un insieme di operazioni, le quali hanno lo scopo di garantire che le funzioni di un apparecchio per misurazione siano conformi ai requisiti per l'utilizzazione prevista.

Gli apparecchi di misurazione vengono utilizzati per verificare che le caratteristiche dei pezzi siano entro le tolleranze prescritte dalle specifiche. Il pezzo viene dichiarato **sicuramente conforme**, in base alla UNI EN ISO 14253-1, se il valore misurato rientra in una zona ottenuta riducendo la zona di specifica di una quantità pari all'incertezza di misura. L'apparecchio di misura contribuisce all'incertezza complessiva tramite le sue caratteristiche metrologiche. I requisiti per le caratteristiche metrologiche vengono espressi in termini di errori massimi ammessi, verificabili tramite taratura. Nel processo di taratura il misurando è costituito dagli errori dello strumento, i quali esprimono il disaccordo tra le misure proposte dallo strumento e il valore del campione usato per la taratura.

Alla taratura segue l'attività di verifica: i risultati della taratura sono confrontati con i limiti imposti a tali errori; a quest'attività si applica la UNI EN 14253-1.

Assegnato a un apparecchio per misurazione un errore massimo ammesso, si individuano:

- Una zona di sicura conformità;
- Una zona di sicura non conformità;
- Una zona di ambiguità o incertezza.

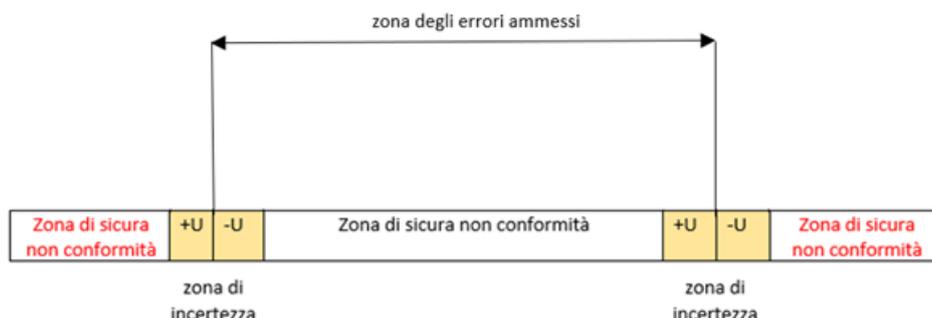


Figura 16: Zone di conformità e non conformità

Se il valore dell'errore cade nella zona di sicura conformità, è possibile dichiarare positivo l'esito della conferma metrologica dello strumento; se l'errore ricade nella zona di ambiguità, il processo di taratura deve essere riesaminato al fine di ridurre l'incertezza; se il valore cade nella zona di sicura non conformità bisogna esaminare gli effetti sulle misure e decidere quale attività intraprendere. Una prima attività che si può considerare è la correzione degli errori nel caso in cui abbiano un comportamento sistematico e lo strumento lo consenta.

La Macchina di Misura a Coordinate è un esempio di strumento che è possibile correggere dopo la taratura. Tramite un opportuno software, è possibile compensare gli errori rilevati. Dopo la correzione, lo strumento deve essere sottoposto di nuovo alla taratura per verificare che le correzioni apportate abbiano raggiunto lo scopo e quindi lo strumento risulti conforme ai requisiti metrologici.

3.1.2 Compensazione software degli errori geometrici

Le Macchine di Misura a Coordinate possono essere affette da errori geometrici, derivanti ad esempio dall'assemblaggio, ma sono comunque in grado di

mostrare un comportamento ripetibile che si manifesta nella capacità di posizionarsi in un punto dello spazio in maniera sempre uguale. Sfruttando la ripetibilità del comportamento della CMM è possibile superare le imprecisioni produttive attraverso un processo di rilevamento e correzione a posteriori degli errori geometrici. La compensazione degli errori geometrici si basa su una descrizione cinematica della CMM tramite un modello matematico che metta in evidenza la relazione tra gli errori geometrici delle guide su cui scorrono i carri della macchina e l'errore di posizione di un particolare punto della CMM. I parametri che definiscono questo modello devono essere rilevati sperimentalmente in modo da calcolare, in ogni punto del volume di misura, l'errore di posizione a cui è soggetto il centro dell'elemento di contatto dello stilo e applicare così l'opportuna correzione ai vari punti misurati dalla macchina. Si può immaginare il volume di misura di una CMM, senza compensazione, come un reticolo distorto, in cui la distanza fra due punti varia in funzione della posizione dei punti stessi. Gli errori rilevati tramite questa procedura sono generalmente descritti in forma tabellare e nel loro insieme realizzano la **mappa di compensazione** o mappa d'errore. Si può immaginare il volume di misura di una CMM, senza compensazione, come un reticolo distorto, in cui la distanza fra due punti varia in funzione della posizione dei punti stessi. Gli errori rilevati tramite questa procedura sono generalmente descritti in forma tabellare e nel loro insieme realizzano la mappa di compensazione o mappa d'errore.

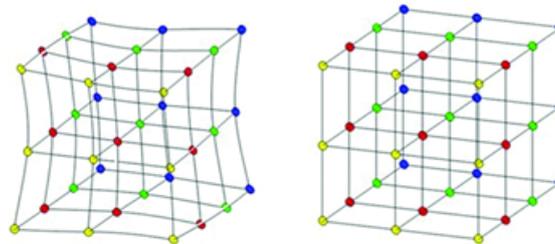


Figura 17: Volume di misura non compensato e compensato

La compensazione software degli errori geometrici consente di migliorare la prestazione delle macchine senza dover raggiungere precisioni molto elevate nella realizzazione delle guide di scorrimento della macchina stessa. La condizione fisica della macchina non viene modificata, ma viene corretto l'effetto di alcuni errori geometrici, i quali devono essere ripetibili. Eliminando gli errori matematicamente si abbassa il costo di produzione e si incrementa il rendimento dell'investimento del cliente.

3.2 Il sistema a coordinate

Nel mondo della misura vi sono due tipi di sistemi di coordinate. Il primo è il sistema di coordinate macchina, in cui gli assi X,Y,Z si riferiscono ai movimenti della macchina. Il secondo sistema di coordinate è il sistema di coordinate pezzo in cui i tre assi si correlano ai riferimenti o elementi del pezzo da misurare. Con l'attuale software della CMM, la macchina misura i riferimenti del pezzo (dal disegno del pezzo), definisce il sistema di coordinate del pezzo e lo mette in relazione matematicamente con il sistema di coordinate macchina. Quest'operazione di messa in relazione fra i due sistemi di coordinate prende il nome di **allineamento**.

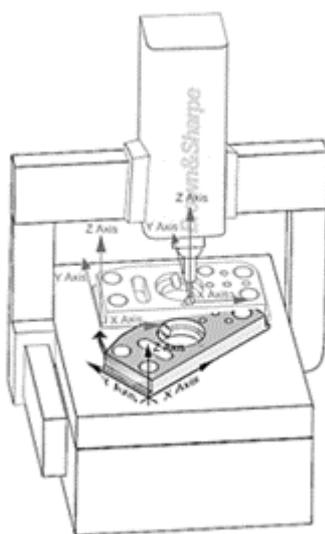


Figura 18: Diversi sistemi di coordinate

Un allineamento consente di definire la posizione e l'orientamento del pezzo in uno spazio 3D, permettendo alla macchina di individuare la posizione del pezzo. Un pezzo senza allineamento dispone di sei gradi di libertà. Un sistema di coordinate di riferimento limita i sei gradi di libertà, fissando il pezzo nello spazio. Gli elementi di riferimento primario, secondario e terziario identificano gli elementi da misurare e da usare per creare l'allineamento.

3.3 Caratteristiche costruttive di una CMM

Una CMM è costituita dai seguenti sistemi:

- Sistema macchina (struttura macchina + scale di lettura): questo sistema provvede a spostare il tastatore nel volume della CMM, secondo una terna di assi cartesiani. Le scale di lettura sono trasduttori di spostamento che, applicati ad ogni carro, consentono di individuarne la posizione lungo la rispettiva direzione di scorrimento;
- Sistema tastatore;
- Sistema software per l'elaborazione dei dati.

Per il sostentamento dei carri di movimentazione si utilizzano dei cuscinetti pneumatici. Tali cuscinetti sono studiati per ottenere la massima rigidità in relazione al carico sopportato. I cuscinetti sono collegati ad un impianto ad aria compressa, tale da fornire una pressione di 0,4 MPa.

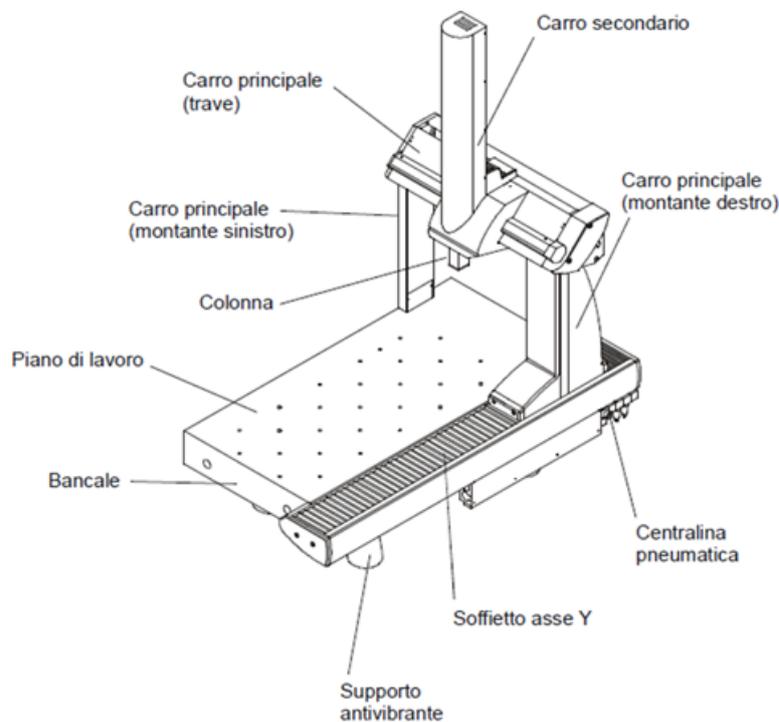


Figura 19: Macchina di misura a coordinate

4 Tastatori e qualifica

Il sistema tastatore è affetto da errori, i quali derivano da una diversa risposta in base alla direzione di contatto (anisotropia) e alle derive termiche. Questi errori non possono essere eliminati, ma possono essere ridotti e stimati. Gli errori rilevati durante la qualifica vengono incorporati nel diametro efficace dell'elemento di contatto, e degradano dopo ogni misura; è necessario per questo motivo che il processo di qualifica avvenga con frequenza. Inoltre, l'effetto termico, che è nullo immediatamente dopo la qualifica, cresce progressivamente, oppure oscilla. La qualifica va ripetuta spesso per minimizzare la separazione temporale, la deriva e quindi l'errore. Per ottenere accuratissime, è possibile riquilibrare il tastatore ogni volta che si cambia posizione.

Gli obiettivi della qualifica sono:

- Determinare il diametro dinamico dell'elemento di contatto dello stilo;
- Determinare le coordinate del centro dell'elemento di contatto rispetto ad un riferimento comune (probe offset) nel caso di stili multipli/posizioni multiple.

Se le punte del tastatore non vengono calibrate, non si può passare all'esecuzione di una routine di misurazione. Il sistema tastatore è estremamente importante per l'esecuzione di misure con CMM. Attraverso tale sistema si individua un punto sulla superficie del pezzo in esame e tramite la lettura della CMM vengono fornite in output le sue coordinate. È chiaro che l'accuratezza del tastatore è decisiva per quella della lettura finale; ciò vale per tutti gli elementi della sequenza cinematica, come giochi o isteresi nello scorrimento fra i corpi. È possibile affermare che il tastatore è un elemento critico nel processo di misurazione.

Tra i principali tipi di tastatori ci sono:

- Tastatore trigger: acquisisce la posizione del punto nel volume di misura della CMM generando un segnale di tensione dopo essere entrato in contatto col pezzo;
- Tastatore proporzionale: fornisce un segnale proporzionale allo spostamento dell'elemento sensibile dalla posizione di "zero". Questo tastatore possiede tanti trasduttori quanti sono i gradi di libertà e possono essere utilizzati in scansione.

4.1 Presa punto

La rilevazione di un punto è basata su una forza che si genera nel contatto con la parte. La corsa della CMM continua fino a quando la forza è sufficiente: il tratto di corsa dal primo contatto alla rilevazione del punto determina una penetrazione apparente del pezzo. La penetrazione apparente è dominata da tre cause:

- La forza di contatto minima necessaria per la rilevazione. Per i tasteri trigger sono necessarie forze piccole (dell'ordine di $10^{-2}N$), mentre quelli proporzionali, che in genere sono utilizzati in scansione, sono più lenti e pesanti (dell'ordine di $10^{-1}N$);
- La rigidità dello stilo. All'aumentare della lunghezza e della complessità di tale sistema aumenta la cedevolezza alla forza di contatto. Se è possibile, è necessario preferire stili corti e rigidi, con una struttura poco complessa;
- L'effettiva penetrazione elastica nella superficie. Questa penetrazione è legata alla forza e al diametro della punta del tastatore: più grande la forza e più piccolo il diametro, maggiore la penetrazione elastica. Il fenomeno risulta in genere trascurabile, con valori che non superano il decimo di micron.

La CMM interpreta la penetrazione apparente come una riduzione apparente del diametro dell'elemento di contatto: è come se il tastatore rilevi il contatto senza deformazione, ma con un elemento di contatto con diametro inferiore. Attraverso questa riduzione si ha il recupero della penetrazione apparente, attraverso il processo di qualifica. Prima di essere utilizzato, il sistema tastatore dev'essere qualificato, cioè utilizzato per misurare un elemento noto che molto spesso è costituito da una sfera di qualifica.

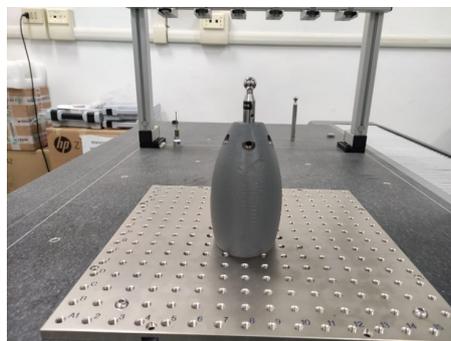


Figura 20: Sfera di qualifica

Dalla differenza tra il valore del diametro ottenuto attraverso la lettura delle scale e il valore di taratura della sfera di qualifica, la macchina di misura a coordinate determina il diametro dell'elemento di contatto; il valore è associato allo specifico tastatore e in seguito è usato automaticamente per la compensazione della dimensione dell'elemento di contatto. Quindi la penetrazione apparente è recuperata grazie alla riduzione del diametro dell'elemento di contatto; questo valore è definito diametro efficace, diverso da quello fisico. Il valore della penetrazione apparente, e quindi la riduzione apparente del diametro dell'elemento di contatto, sono strettamente legati alla rigidità dello stilo utilizzato; al fine di garantire una compensazione efficace bisogna ripetere il processo di qualifica tutte le volte che si cambia la configurazione dello stilo.

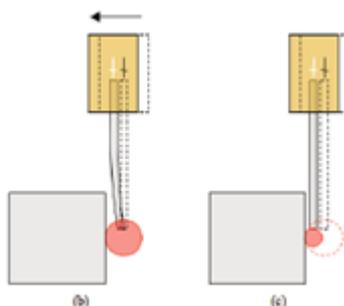


Figura 21: Riduzione apparente del diametro dell'elemento di contatto

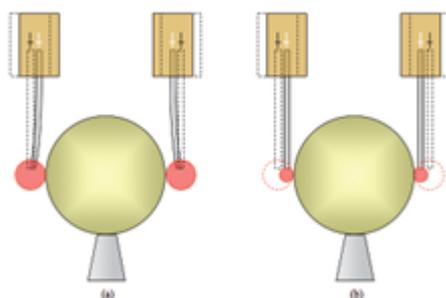


Figura 22: Recupero penetrazione apparente mediante qualifica del tastatore

4.2 Anisotropia

La risposta del tastatore può essere affetta da anisotropia e quindi può variare a seconda della direzione di avvicinamento al pezzo. Il numero di punti che vengono rilevati durante la qualifica dipende dal tipo di tastatore utilizzato; questi punti sono disposti a diverse posizioni angolari sulla sfera di qualifica. Questa modalità fa sì che il tastatore venga sollecitato in diverse direzioni. Le diverse risposte che si ottengono per i vari punti portano a definire un errore di forma complessivo (apparente). Le ragioni del comportamento anisotropo del sistema tastatore sono:

- *Meccanismo di rilevazione*

TRIGGER: per tastatori trigger, la rilevazione avviene di solito per apertura di un contatto elettrico, costituito da un equipaggio che porta il sistema stilo, tenuto da una molla in sede su una base solidale con il corpo del tastatore. Si ha apertura del contatto elettrico quando il momento della forza di contatto supera quello della molla di contrasto. L'anisotropia della risposta è legata al fatto che lo stilo flette diversamente quando sollecitato nelle diverse direzioni. L'appoggio è formato da tre sfere che sono equispaziate di 120° :

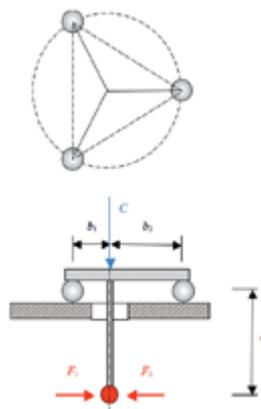


Figura 23

PROPORZIONALI: è una tipologia di tastatore più accurato rispetto ai tastatori trigger. La rilevazione è tipicamente effettuata misurando le deformazioni individuali di una serie di tre parallelogrammi montati in direzioni fra loro ortogonali. Piccole differenze nelle costanti elastiche dei tre parallelogrammi ed errori di ortogonalità nel loro montaggio determinano anisotropia della risposta.

- *Rigidità non isotropa del sistema stilo*
Per uno stilo rettilineo verticale a sezione circolare la rigidità è ragionevolmente isotropa nel piano xy, mentre sarà molto più rigido in direzione z. Per configurazioni complesse, risulta improbabile avere una rigidità uguale in tutte le direzioni.
- *Errore di forma dell'elemento di contatto*
Se la sferetta del tastatore non ha una forma perfetta, il contatto avverrà a distanze diverse dal centro a seconda della direzione.

4.3 Qualifica tastatore in PC-DMIS

Per iniziare il processo di qualificazione è necessario innanzitutto definire un utensile di qualificazione. Il tipo di misurazione da eseguire sull'utensile dipende dal tipo di utensile stesso (di solito una SFERA) e dal tipo di punta. PC-DMIS visualizza la finestra di dialogo Utensile di calibrazione spostato se la macchina di misura e la configurazione del tastatore permettono di individuare l'utensile di qualificazione mediante i punti DCC.

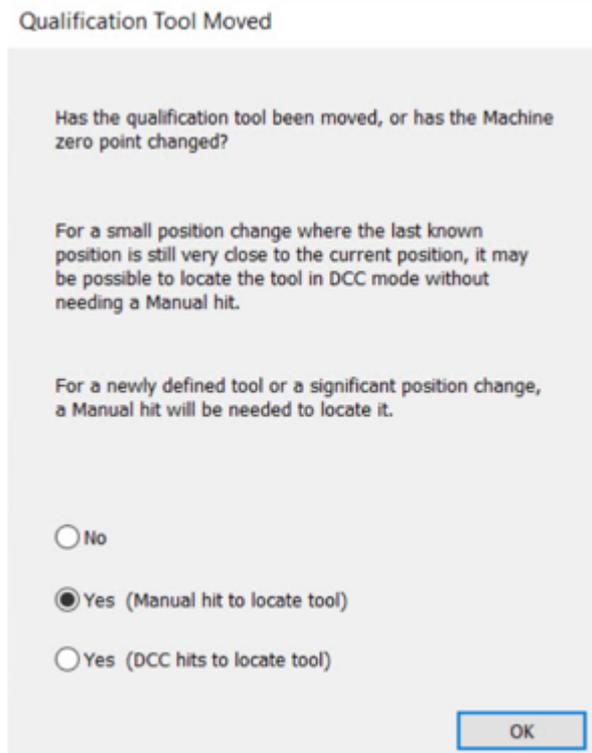


Figura 24

- Se si seleziona **No**, PC-DMIS visualizza la finestra di dialogo **Esecuzione**. Tuttavia, non occorrerà acquisire alcun punto manuale;
- Se si seleziona **Sì (punto manuale per localizzare l'utensile)**, PC-DMIS visualizza la finestra di dialogo **Esecuzione**. Questa richiede che si acquisiscano uno o più punti in modalità manuale prima di procedere con la calibrazione;
- Se si seleziona **Sì (punti DCC per localizzare l'utensile)**, PC-DMIS visualizzerà la finestra di dialogo **Esecuzione** e tenterà automaticamente di usare i punti DCC per localizzare l'utensile di calibrazione. Si può usare questa opzione quando l'utensile di calibrazione è stato spostato molto vicino alla posizione precedente.

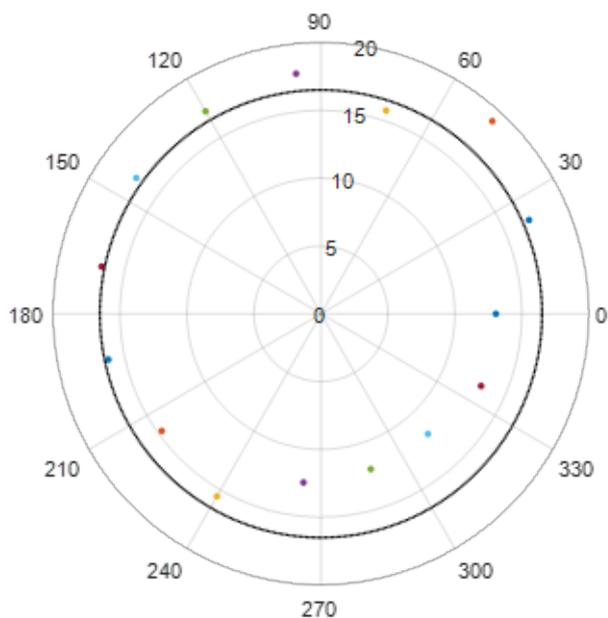
A questo punto, PC-DMIS visualizza la finestra di dialogo **Controllo collisione**, in cui viene richiesto se si desidera eseguire il controllo delle collisioni con il montante della macchina.

- Se si seleziona **No**, PC-DMIS continua la calibrazione standard (ovvero non esegue il controllo collisione);
- Se si risponde **Sì**, PC-DMIS verifica eventuali collisioni con i limiti correnti nell'area Limiti CMM. Se necessario, PC-DMIS aggiunge eventuali spostamenti di sicurezza.

Al termine della misurazione, PC-DMIS calcolerà i risultati della calibrazione in base al tipo di tastatore, all'utensile usato e all'operazione richiesta. In generale, PC-DMIS non può rilevare se la punta di un tastatore necessita di una nuova calibrazione. Bisogna accertarsi di eseguire una nuova calibrazione ogni volta che si apporta una modifica al tastatore.

5 Misura per punti

La prima modalità impiegata per la valutazione dell'errore di forma è la misura per punti. Effettuando una misura per punti è possibile osservare praticamente come vengono applicati i diversi algoritmi e qual è il loro effetto sui risultati finali. Poiché la qualità della misura migliora all'aumentare del numero di punti rilevato, si procede con la modalità automatica del software e si imposta il numero di punti che si ritiene necessario per acquisire le informazioni desiderate. A partire dai punti rilevati, il software definisce automaticamente un cerchio attraverso il metodo dei minimi quadrati. Il numero di punti scelto per questa misura è pari a 15. Nella tabella che segue si osserva la distanza radiale di ogni punto rispetto alla posizione teorica.



Punto	Deviazione [μm]
1	1
2	3.6
3	-1
4	1.6
5	0.8
6	0.8
7	0.5
8	-0.5
9	2.3
10	-1.3
11	-5.5
12	-6.6
13	-6
14	-5.2
15	-5.4

 Figura 25: *Polarplot* Matlab

Tabella 2

Per apprezzare graficamente lo scostamento dei punti rilevati, si moltiplica la deviazione dal cerchio di riferimento per 700.

5.1 Determinazione del cerchio di minima zona

L'individuazione del cerchio di minima zona rappresenta il miglior modo per stimare l'errore di rotondità. L'obiettivo è quello di cercare due cerchi concentrici la cui distanza radiale sia minima e che contengano tutti i punti rilevati. Si tratta di un problema non lineare a più variabili. Esistono diversi metodi per la determinazione del cerchio di minima zona, tra cui tecniche computazionali geometriche o la soluzione di problemi di ottimizzazione non lineari. Il primo approccio è, in generale, più costoso a livello computazionale, soprattutto quando il numero di punti acquisiti è grande. Il secondo approccio è basato su una funzione di ottimizzazione, ma l'inconveniente in questo caso è che la funzione ha tanti minimi locali. Alcuni esempi sono l'approssimazione di Chebyshev e il metodo Simplex.

L'errore di rotondità può essere definito come segue:

$$Err = R_{max} - R_{min} \quad (5.1)$$

dove R_{max} e R_{min} rappresentano la distanza massima e minima tra il cerchio di minima zona e il profilo misurato.

L'equazione del cerchio si scrive come:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_c^2 \quad (5.2)$$

dove x_c e y_c sono le coordinate del centro del cerchio. Per ogni punto misurato $M_i(x_i, y_i)$, la distanza rispetto al centro del cerchio è:

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (5.3)$$

È necessario minimizzare la distanza fra due cerchi concentrici che sono tangenti esteriormente e interiormente al profilo rilevato. La funzione obiettivo assume la forma seguente:

$$F(x_c, y_c) = Min\{|R_i|_{max} - |R_i|_{min}\} \quad (5.4)$$

dove $R_i|_{max}$ rappresenta il raggio del cerchio più esterno ed $R_i|_{min}$ il raggio del cerchio più interno. Sviluppando la relazione (5.4) risulta:

$$F(x_c, y_c) = Min\{Max(\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}) - Min(\sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2})\} \quad (5.5)$$

5.1.1 Determinazione del cerchio di minima zona basata sul minimo cerchio circoscritto

Si presenta un algoritmo per la determinazione del cerchio di minima zona. Basandosi sul minimo cerchio circoscritto (MCC) si selezionano due punti sul cerchio più esterno e uno sul cerchio più interno, concentrico rispetto al primo. Questi punti rappresentano i primi candidati per l'individuazione del cerchio di riferimento. Bisogna trovare due cerchi concentrici che racchiudano il profilo rilevato, facendo in modo che la loro deviazione radiale sia minima. Il cerchio esterno e il cerchio interno devono passare ciascuno per due punti. Questi quattro punti di controllo devono rispettare il principio esterno-interno-esterno-interno.

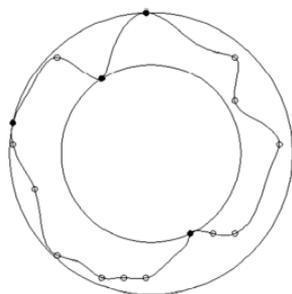


Figura 26: Punti di controllo per il cerchio di minima zona

I candidati iniziali sono determinati attraverso due step. Innanzitutto, bisogna determinare un punto interno e due punti esterni basandosi sul minimo cerchio circoscritto. Il secondo step è quello di spostare il centro lungo la perpendicolare al segmento che unisce i due punti esterni in modo da individuare un altro punto del cerchio interno.

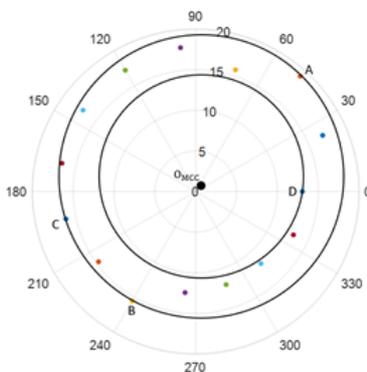


Figura 27: Punti di controllo per il cerchio di minima zona

A, B e C sono i punti di controllo per il cerchio minimo circoscritto. Dato un set di punti $P_i = (x_i, y_i)$, con $i = 1, \dots, n$, la distanza r_i fra il punto i-esimo e il centro del cerchio MCC si scrive come:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \quad (5.6)$$

Il primo candidato D sul cerchio interno deve soddisfare la seguente condizione:

$$\min\{r_i\} \quad (5.7)$$

I punti A e B sono selezionati come i due punti candidati sul cerchio esterno secondo il criterio esterno-interno-esterno-interno.

L'operatore d_j è la distanza fra il punto medio E del segmento AB e il punto di intersezione fra la linea $O_{MCC}E$ e la perpendicolare al segmento che unisce D ai punti che rappresentano il possibile secondo candidato sul cerchio interno.

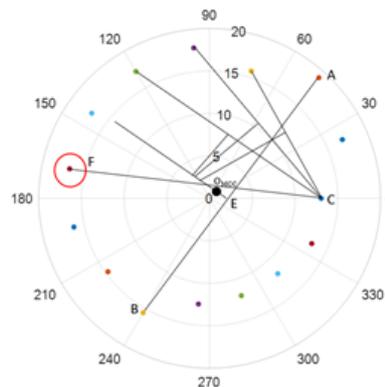


Figura 28

Il secondo candidato F, come mostrato in figura, deve soddisfare la seguente condizione:

$$\min\{d_i\} \quad (5.8)$$

Se un punto si trova al di fuori di due cerchi concentrici costruiti a partire dai 4 punti A, B e D, F, allora questo diventerà il nuovo candidato, che deve rispettare i seguenti requisiti:

$$\begin{cases} R_k - R > 0 \\ \max\{R_k\} \end{cases} \quad (5.9)$$

dove R è il raggio del cerchio esterno e R_k la distanza del k -esimo punto dal centro $O(x_0, y_0)$ del cerchio concentrico. Infine, i quattro punti devono soddisfare la regola esterno-interno-esterno-interno.

In questo caso si evidenziano 3 punti che si trovano all'esterno dei cerchi costruiti da A, B e D, F:

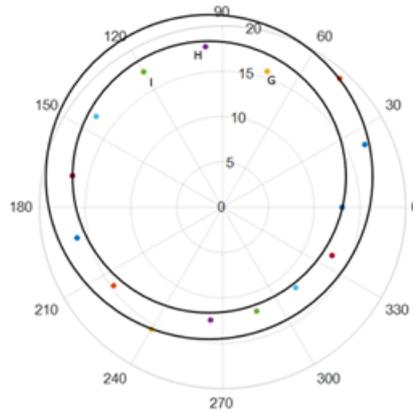


Figura 29

Tra questi, G è il punto che minimizza il parametro d_j . Ricostruendo i 2 cerchi concentrici si ottiene:

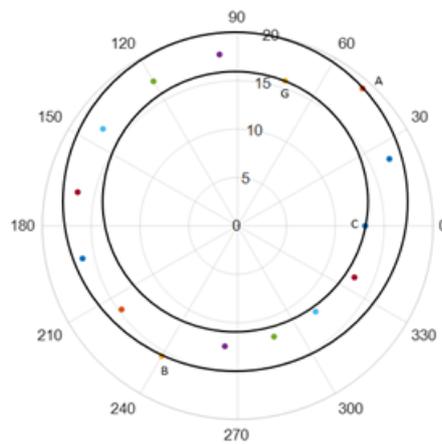


Figura 30

Si riportano le coordinate dei punti A, B, C e G:

Punto	x[mm]	y[mm]
A	11.0368	12.2638
B	-8.2384	-14.2895
C	16.5007	0.0088
G	5.0957	16.6954

Tabella 3

Sfruttando le informazioni relative alla posizione dei punti e imponendo la concentricità dei cerchi, è possibile determinare il centro (x_c, y_c) del cerchio di zona minima e il valore dei raggi:

$$(x_c[mm], y_c[mm]) = (0.0011, 0.0020)$$

$$R_{esterno} = 16.5015mm \quad R_{interno} = 16.4954mm$$

Di seguito si riporta una sintesi dell'algoritmo appena presentato:

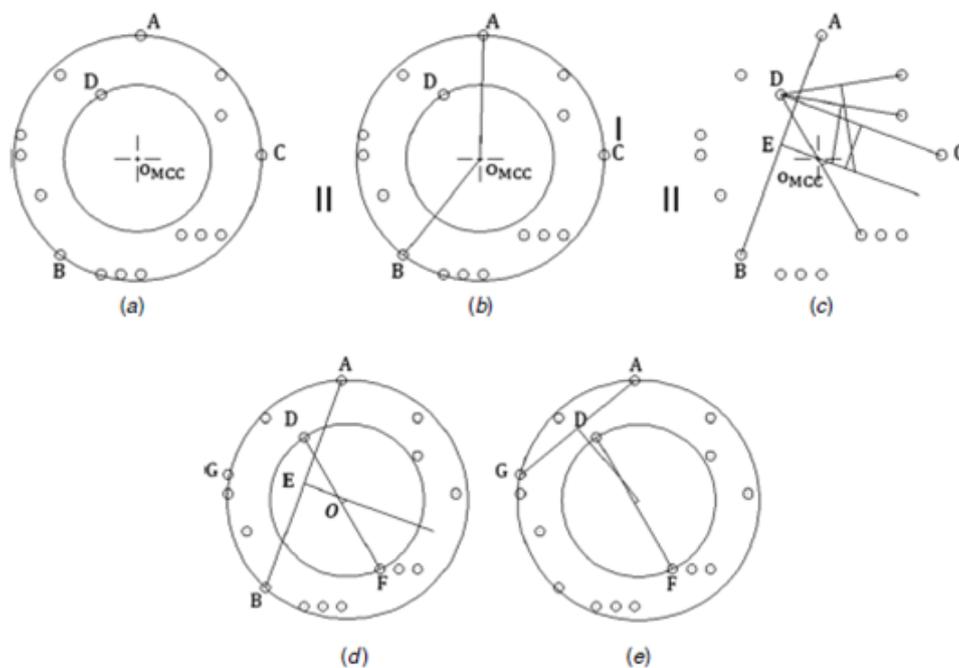


Figura 31

5.1.2 Determinazione del cerchio di minima zona basata sul cerchio dei minimi quadrati

È possibile riassumere l'algoritmo nei seguenti step:

1. Il primo passo è il calcolo del cerchio dei minimi quadrati a partire dalle coordinate (x_i, y_i) degli n punti rilevati sul profilo circolare. Il cerchio dei minimi quadrati avrà centro (x_{0LSC}, y_{0LSC}) e raggio r_{LSC} .
2. L'origine del sistema di coordinate viene spostata nel centro (x_{0LSC}, y_{0LSC}) , ottenendo così un nuovo sistema di riferimento X_{LSC}, Y_{LSC} . Le coordinate degli n punti nel nuovo sistema di riferimento sono (x'_i, y'_i) e sono ottenute come: $x'_i = x_i - x_{0LSC}$ e $y'_i = y_i - y_{0LSC}$.
3. Le coordinate cartesiane sono convertite in coordinate polari, così che:

$$r_i = \sqrt{x_i'^2 + y_i'^2} \text{ e } \theta_i = \tan^{-1} \frac{y'_i}{x'_i}$$

4. Il problema di ottimizzazione, rispetto al sistema X_{LSC}, Y_{LSC} si presenta nella forma:

$$\begin{cases} \min(r_{maxj} - r_{minj}) \\ r_{maxj} + x'_{0MZCj} \cos \theta_i + y'_{0MZCj} \sin \theta_i \geq r_i, i \in [1, n] \\ r_{minj} + x'_{0MZCj} \cos \theta_i + y'_{0MZCj} \sin \theta_i \leq r_i, i \in [1, n] \\ r_{maxj}, r_{minj} > 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

5. Il raggio del cerchio di minima zona (r_{MZCj}) si ottiene da:

$$r_{MZCj} = \frac{r_{maxj} + r_{minj}}{2} \quad (5.11)$$

Ritornando al sistema di riferimento di partenza (X,Y) e rispetto all'iterazione in questione, le coordinate del centro del cerchio di minima zona sono:

Se $j=1$

$$x_{0MZCj} = x'_{0MZCj} + x_{0LSC} \quad (5.12)$$

$$y_{0MZCj} = y'_{0MZCj} + y_{0LSC} \quad (5.13)$$

Se $j \neq 1$

$$x_{0MZCj} = x'_{0MZCj} + x_{0MZCj-1} \quad (5.14)$$

$$j_{0MZCj} = j'_{0MZCj} + j_{0MZCj-1} \quad (5.15)$$

6. Per assicurarsi che l'approssimazione sia valida, si valuta la distanza tra l'origine del sistema di riferimento usato alla j -esima iterazione e il centro del cerchio di minima zona calcolato nella stessa iterazione. Se il valore è nullo, il processo è terminato, altrimenti bisogna considerare un nuovo sistema di riferimento con centro (x_{0MZCj}, y_{0MZCj}) .

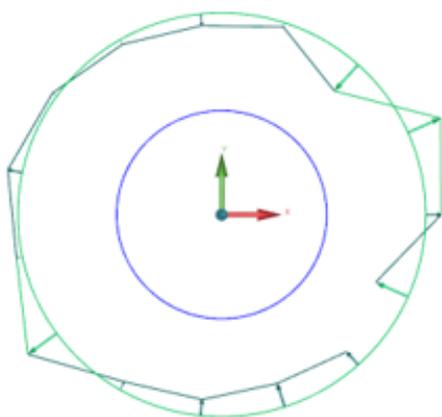
Le nuove coordinate dei punti saranno : $x'_i = x_i - x_{0MZCj}, y'_i = y_i - y_{0MZCj}$, iniziando una nuova iterazione.

5.2 Risultati della misura

Come introdotto precedentemente, è necessario definire un cerchio di riferimento rispetto al quale si andrà a valutare l'errore di circolarità.

Si confrontano i risultati che possono essere ottenuti con i diversi algoritmi:

CERCHIO DI CHEBYSHEV



Punto	Deviazione [μm]
1	4.2
2	5.7
3	-0.6
4	1.2
5	-0.2
6	-0.5
7	-0.3
8	0.1
9	-0.6
10	2.1
11	-0.9
12	-0.6
13	-0.5
14	0.8
15	-0.1

Figura 32: Cerchio Chebyshev PC-DMIS

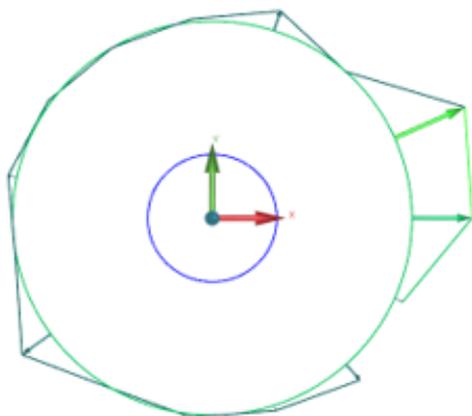
Tabella 4

Deviazione massima [μm]	2.9
Deviazione minima [μm]	-2.9
Range [μm]	5.8
Media [μm]	0.7
Σ [μm]	1.9

Tabella 5

Con il metodo di Chebyshev si determina un cerchio medio tra i picchi e le valli della serie di punti. L'obiettivo è quello di minimizzare la differenza tra la deviazione più piccola e quella più grande. Si può osservare che lo scostamento minimo e massimo sono uguali in valore assoluto.

MASSIMO CERCHIO INSCRITTO¹



Punto	Deviazione [μm]
1	5.0
2	6.3
3	0.0
4	1.7
5	0.3
6	0.0
7	0.2
8	0.7
9	0.1
10	2.9
11	0.0
12	0.3
13	0.4
14	1.8
15	0.7

Figura 33: MCC PC-DMIS

Tabella 6

Deviazione massima [μm]	6.3
Deviazione minima [μm]	0.0
Range [μm]	6.3
Media [μm]	1.4
Σ [μm]	1.9

Tabella 7

Nel caso del massimo cerchio inscritto non ci sono deviazioni con valore negativo. Si può osservare come l'errore valutato con questo metodo sia superiore rispetto al caso precedente.

¹Si ricorda che il massimo cerchio inscritto si utilizza quando si analizza il diametro interno di un pezzo. In questo caso tale risultato è riportato soltanto per effettuare un confronto numerico tra i valori che si ottengono utilizzando i diversi approcci.

MINIMO CERCHIO CIRCOSCRITTO

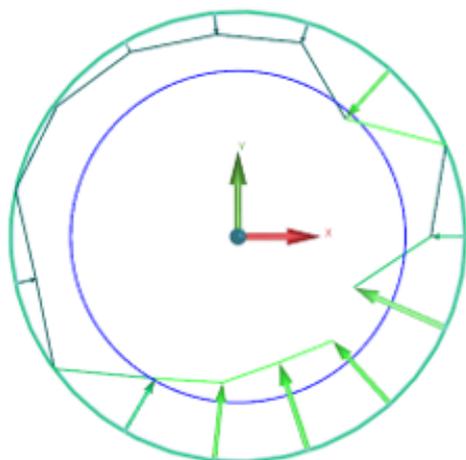


Figura 34: MIC PC-DMIS

Punto	Deviazione [μm]
1	-2.5
2	0.0
3	-4.9
4	-1.5
5	-1.6
6	-0.9
7	-0.2
8	0.0
9	-1.5
10	0.0
11	-4.5
12	-5.7
13	-6.8
14	-6.2
15	-7.3

Tabella 8

Deviazione massima [μm]	0.0
Deviazione minima [μm]	-7.3
Range [μm]	7.3
Media [μm]	-2.9
Σ [μm]	2.7

Tabella 9

Adottando come riferimento il minimo cerchio circoscritto, non ci sono deviazioni con valore positivo. La stima dell'errore ottenuta con questo approccio assume il valore massimo fra i casi analizzati.

5.3 Cerchio dei minimi quadrati

A partire dalle formule e dai dati riportati in appendice A, si determinano le coordinate del centro e il raggio del cerchio dei minimi quadrati.

Il metodo dei minimi quadrati è una tecnica di ottimizzazione (o regressione) che permette di trovare il cerchio che si avvicina il più possibile all'insieme di punti dato. In particolare, l'obiettivo è quello di minimizzare la somma dei quadrati delle distanze tra i dati osservati e il cerchio di riferimento stesso.

Di seguito sono sintetizzati i valori che caratterizzano il set di dati rilevati con la misura per punti.

Si ha $N = 15$, $\bar{x} = 0,004$, $\bar{y} = 0,006$. $S_{uu} = 2041$ $S_{uv} = 0.287$ $S_{vv} = 2042$, $S_{uuu} = -11.395$, $S_{vvv} = -4.838$, $S_{uuv} = -5.441$, $S_{vuu} = -3.260$.

Il sistema lineare costituito dalle equazioni (A.8) e (A.9) è il seguente:

$$\begin{bmatrix} 2041 & 0.287 \\ 0.287 & 2042 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -8.418 \\ -4.050 \end{bmatrix}$$

Da cui si ottengono $u_c = -0.004$ e $v_c = -0.002$. Le coordinate del centro nel riferimento di partenza sono:

$$(x_c = 0 \text{ mm}, y_c = 0.004 \text{ mm})$$

Sostituendo questi valori nell'equazione (A.10) si ottiene il valore del raggio $R=16,498$ mm. Questi risultati sono perfettamente coerenti con quelli ottenuti attraverso il software PC-DMIS.

5.4 Rimozione punti anomali

Nel caso di una linea best fit o di ricompensazione best fit è possibile scegliere di rimuovere i punti anomali in base alla distanza dall'elemento best fit. Ciò consente la rimozione di anomalie nel processo di misurazione. Dopo aver adattato un cerchio ai dati, è possibile individuare dei punti anomali in base al fattore moltiplicativo della deviazione standard.

Il software PC-DMIS procede come segue:

- Ricalcola il cerchio best fit dopo la rimozione dei punti anomali;
- Controlla ulteriori punti dispersi;
- Ricalcola il cerchio best fit;
- Il processo viene ripetuto fino alla completa eliminazione dei punti anomali.

5.4.1 Coefficiente moltiplicativo della deviazione standard

Il valore di questa opzione definisce la selettività del filtro. Può essere qualsiasi numero reale maggiore di 0. Se il valore selezionato è m , indicata con Σ la deviazione standard, tutti i punti rilevati la cui deviazione dal cerchio best fit è maggiore di $m \times \Sigma$ sono esclusi dal calcolo. Questo vuol dire che quanto minore è il valore di m , tanto più selettivo è il filtro. Quindi, nella prima valutazione viene calcolata la deviazione standard di tutti i punti. In una distribuzione normale, potrebbe essere rappresentata come segue:

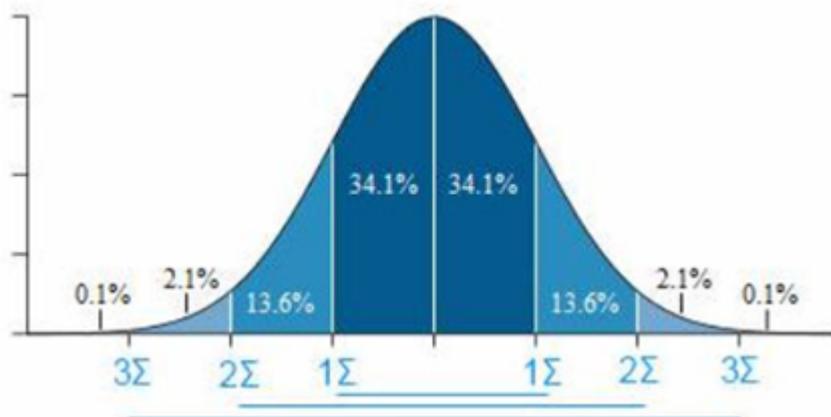


Figura 35

Si confrontano i risultati che si ottengono utilizzando diversi valori per il fattore moltiplicativo della deviazione standard. Si considera la ricompensazione best fit con cerchio dei minimi quadrati.

I risultati sono evidenziati di seguito:

CERCHIO MINIMI QUADRATI

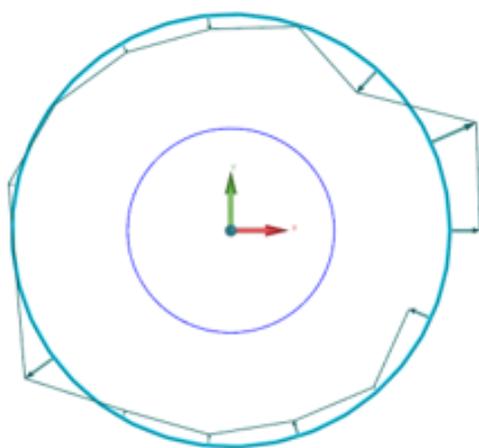


Figura 36: LSC PC-DMIS

Punto	Deviazione [μm]
1	2.3
2	3.8
3	-2.3
4	-0.1
5	-1.1
6	-0.8
7	-0.1
8	0.6
9	0.0
10	2.7
11	-0.6
12	-0.8
13	-1.2
14	-0.4
15	-1.8

Tabella 10

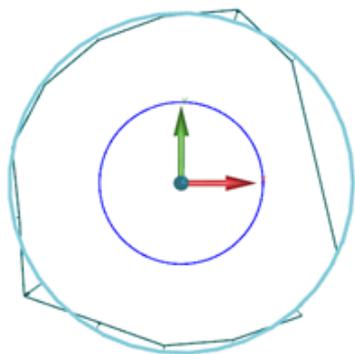
Deviazione massima [μm]	3.8
Deviazione minima [μm]	-2.3
Range [μm]	6.1
Media [μm]	0.0
Σ [μm]	1.7

Tabella 11

Supponendo di utilizzare un coefficiente moltiplicativo $m=2$ si ha:

$$m \times \Sigma = 3.4$$

La deviazione del punto 2 è superiore a questo valore; il software rimuove tale punto e procede ricalcolando il cerchio best fit. Il risultato finale, dopo la completa rimozione dei punti dispersi è il seguente:

 CERCHIO MINIMI QUADRATI ($m=2$)

 Figura 37: LSC con $m=2$

m	2
Numero punti	12
Numero punti isolati	3
Deviazione max [μm]	1.0
Deviazione min [μm]	-0.9
Errore [μm]	1.9

Tabella 12

Si evidenzia la deviazione dei vari punti rispetto al nuovo cerchio best fit, indicando in rosso i punti che sono stati eliminati:

Punto	Deviazione [μm]
1	4.0
2	5.4
3	-0.8
4	1.0
5	-0.3
6	-0.4
7	0.0
8	0.6
9	-0.1
10	2.7
11	-0.3
12	-0.2
13	-0.2
14	-0.9
15	-0.2

Tabella 13

6 Il filtraggio

Al fine di migliorare la qualità di un segnale, una tecnica di primaria importanza è il filtraggio, attraverso il quale si possono enfatizzare alcune caratteristiche o rimuoverne altre. Data la grande importanza del filtraggio all'argomento è dedicata la serie di norme UNI EN ISO 16610. Per i profili rilevati con la macchina di misura, i segnali non sono nel dominio del tempo, ma dello spazio. Le frequenze temporali sono sostituite da frequenze spaziali. Per comprendere meglio i concetti alla base di questo argomento bisogna chiarire il significato di banda di segnale e i principi dell'analisi armonica, che si basa sulla scomposizione del segnale (in questo caso il profilo rilevato) in una somma di componenti sinusoidali a diversa ampiezza e frequenza. Si distinguono due classi di filtri: lineari e non lineari. La differenza sostanziale è che mentre nei primi si può applicare la trasformata di Fourier, nei secondi ciò non è possibile. Il filtro utilizzato con il software PC-DMIS è un filtro lineare, il filtro Gaussiano.

La trasformata di Fourier

Una trasformata è un operatore, generalmente lineare, di uno spazio di funzioni su un altro spazio di funzioni. Tale operatore è applicato ad una funzione per semplificare alcune operazioni. Una trasformata integrale è un'applicazione realizzata con un integrale. La forma generale di una trasformata integrale $T(f)$ è:

$$T(f)(s) = \int_a^b K(s, t) f(t) dt \quad (6.1)$$

dove $K(s, t)$, la funzione che differenzia le varie trasformazioni, è detta nucleo o kernel della trasformazione. La trasformata di Fourier permette di calcolare le diverse componenti (ampiezza, fase e frequenza) delle onde sinusoidali che, sommate fra loro, danno origine al segnale di partenza. Si tratta di uno strumento per analizzare un segnale $x(t)$ nel dominio delle frequenze.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (6.2)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-i2\pi ft} df \quad (6.3)$$

Trasformata e antitrasformata di Fourier

La banda di un segnale è individuata dalle componenti sinusoidali in cui può considerarsi composto il segnale stesso e può essere individuata come intervallo di frequenze o di lunghezze d'onda.

6.1 I filtri per la rotondità

Scopo dei filtri per la rotondità è quello di separare l'errore di forma dalle irregolarità della superficie dovute alle caratteristiche di rugosità del pezzo per una più chiara lettura del grafico e per ridurre l'incertezza nella valutazione dell'errore di forma. La frequenza di taglio del filtro è la frequenza oltre la quale (o prima della quale) viene esercitata la funzione selettiva del filtro. Generalmente, l'attenuazione alla frequenza di taglio è pari al 50 %. Nelle misure di rotondità, quando si parla di frequenza si intende il numero delle ondulazioni sinusoidali contenute nel profilo in una rotazione completa del pezzo (UPR: undulations per revolution). Un valore standard adottato è 50 UPR; ciò significa che qualsiasi cosa si verifichi meno di 50 volte per giro è considerata la "forma della superficie". Al contrario, se si verifica più di 50 volte, si considera nel regime di rugosità.

Si parla di filtri passa-alto per indicare quei filtri che fanno passare le ondulazioni aventi una frequenza superiore alla frequenza di taglio; si parla invece di filtri passa-basso per indicare quei filtri che fanno passare le ondulazioni aventi una frequenza inferiore a quella di taglio. È possibile esprimere il tutto anche in termini di lunghezza d'onda distinguendo filtri "Longwave-pass" e filtri "Shortwave-pass".

L'azione selettiva di un filtro è individuata dalla sua caratteristica, un grafico che esprime l'attenuazione del filtro stesso (cioè il rapporto fra l'ampiezza del segnale in uscita e l'ampiezza del segnale in ingresso) in funzione della frequenza. Questo valore varia da 1 (segnale completamente trasmesso) a 0 (segnale completamente soppresso). Se si vuole analizzare l'errore di forma, prescindendo dalla rugosità, occorre eliminare le variazioni con frequenza molto alta, che sono legate alle imperfezioni della superficie.

In base alla frequenza, attraverso il filtraggio è possibile selezionare le armoniche che costituiscono il profilo rilevato. Su di esso si deve quindi usare un filtro con una determinata frequenza di taglio per avere in uscita una linea media rispetto a cui sono calcolati gli scostamenti.

6.2 Filtri lineari

Caratteristiche dei filtri lineari:

- La linearità del filtro comporta che ogni frequenza presente nel segnale si comporti indipendentemente dalle altre frequenze;

- Se si scompone il segnale in ingresso nelle sue frequenze costituenti (spettro di frequenza del segnale) il filtro agisce su ognuna in modo indipendente;
- I filtri lineari si caratterizzano mediante il loro comportamento in frequenza.

Ci sono due modi comuni per implementare un filtro:

- Convoluzione nel dominio dello spazio o del tempo;
- Moltiplicazione nel dominio della frequenza.

Attraverso l'analisi di Fourier, questi due metodi sono equivalenti. In entrambi i casi devono essere considerate sia la fase che l'ampiezza.

6.2.1 Filtraggio usando Fourier

L'equivalente della convoluzione è la moltiplicazione grazie a Fourier. Il processo di filtraggio, grazie all'uso della trasformata di Fourier, è il seguente:

- Trasformata di Fourier dei dati;
- Moltiplicazione della trasformata per la funzione di trasmissione;
- Antitrasformata di Fourier.

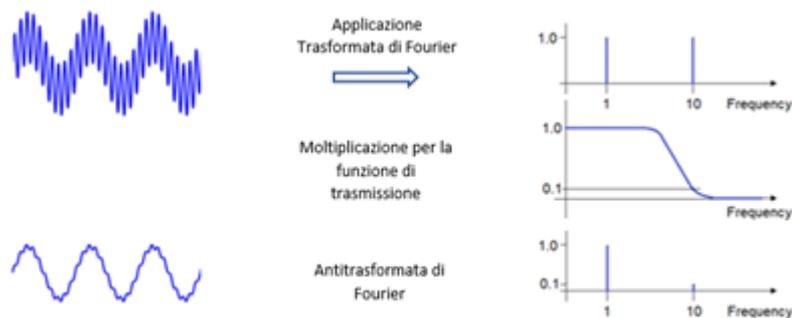


Figura 38

6.2.2 Il filtro gaussiano

Come specificato dalla norma ISO 16610-21, il filtro standard è il filtro gaussiano. Si tratta di un filtro lineare, con una curva caratteristica ben definita, attraverso cui la percentuale di trasmissione per ogni lunghezza d'onda può essere calcolata facilmente.

Per quanto riguarda il filtro è possibile affermare che la funzione nucleo $h(l)$ è una gaussiana.

La caratteristica del filtro gaussiano (Longwave-pass) è la seguente:

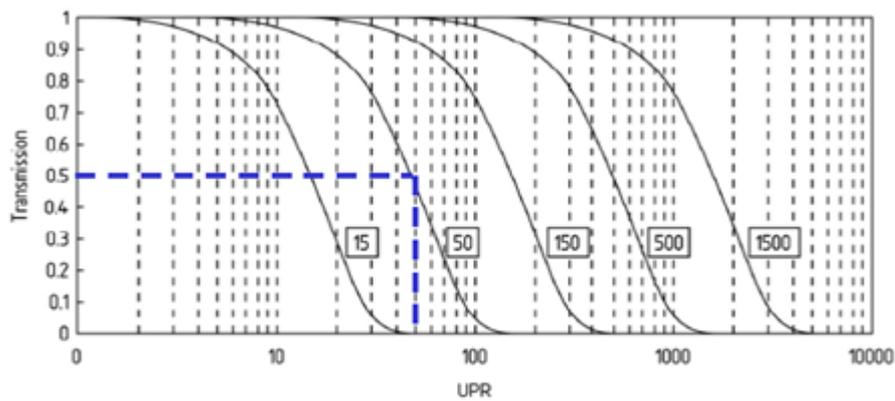


Figura 39

Attraverso il software PC-DMIS è possibile specificare l'intenzione di applicare un filtro gaussiano, introducendo in input una frequenza di taglio in termini di ondulazioni per rotazione.

6.2.3 Effetti indesiderati nell'applicazione dei filtri gaussiani

Il filtro gaussiano può essere influenzato in modo importante dalla presenza di picchi e valli. Il problema può essere facilmente evidenziato nella figura che segue²:

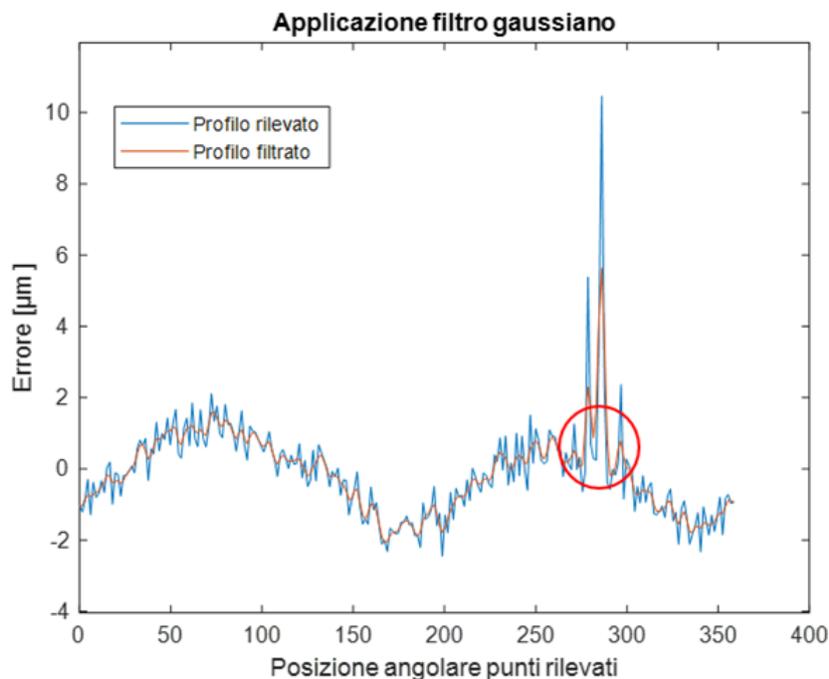


Figura 40

È evidente l'effetto di bordo in corrispondenza del picco, dove il profilo filtrato tende a traslare verso l'alto. Si tratta di un effetto indesiderato.

Quando ciò si verifica una soluzione può essere rappresentata da un filtro non lineare, il filtro gaussiano robusto. Questo tipo di filtro è meno influenzato dalla presenza di picchi e valli. Il filtro gaussiano robusto è descritto nelle ISO 16610-31.

Questo filtro, attraverso una tecnica iterativa, altera il peso della funzione gaussiana nella zona caratterizzata dalla presenza di picchi o valli. Il filtro gaussiano robusto ottimizza la separazione della forma dalla rugosità, riducendo gli effetti di bordo in prossimità di picchi e valli.

²Per ottenere il profilo filtrato è stata utilizzata la funzione sul forum del sito Mathworks reperibile al seguente link: <https://it.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43182-gaussfilt-t-z-sigma>.

6.3 Specifica del filtro nei disegni

Molte volte viene richiesto ai progettisti l'individuazione corretta del filtro. La norma ISO 1101:2017 consente di indicare nel disegno un'impostazione adeguata del filtro direttamente con ciascuna tolleranza di forma. La norma ISO 12181-2 stabilisce i limiti relativi al numero minimo di punti da rilevare durante la scansione e il rapporto minimo tra il diametro della feature e il raggio della punta del tastatore, necessario per impedire distorsioni del profilo di rotondità per via dell'influenza della punta dello stilo.

Longwave-pass		
Trasmissione da 1 UPR a	Numero minimo di punti	Minimo d/r
15	105	5
50	350	15
150	1050	50
500	3500	150
1500	10500	500

Tabella 14

dove d è il diametro della feature e r è il raggio della punta dello stilo.

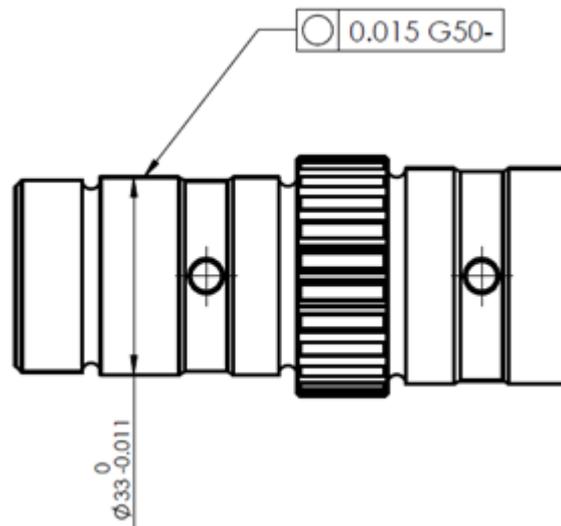


Figura 41

7 Misura in scansione

Il software PC-DMIS consente di eseguire la scansione della superficie intorno a un dato punto a un raggio specificato dal punto stesso.

I parametri che influenzano la misura sono la velocità di scansione e la densità di punti.

Per quanto riguarda la definizione della velocità di avanzamento del tastatore e il numero di punti da prelevare per ogni ente geometrico, sono necessarie le seguenti considerazioni:

- La misura più accurata si esegue sempre con la velocità più bassa; la velocità è una scelta di compromesso fra l'accuratezza di misura e la necessità di misurare lotti di elevata numerosità in linea con il processo produttivo e in accordo con i suoi ritmi. L'influenza della velocità sull'accuratezza di misura è tanto più bassa quanto più è corto e quanto più è rigido lo stilo del tastatore;
- Il numero di punti utilizzato per misurare un elemento geometrico è sicuramente una delle scelte più importanti nella strategia di misura. Il minimo numero di punti per verificare l'errore di forma è di una unità superiore al numero di gradi di libertà dell'elemento geometrico considerato. Tale numero di punti è però insufficiente a fornire una buona misura dell'errore di forma. I punti rilevati devono, in linea di principio, essere uniformemente distribuiti sulla superficie fisica dell'elemento considerato.

Considerando una densità di 5 punti/mm, il numero di punti complessivo rilevato sarà ottenuto considerando la traiettoria seguita dal centro della punta del tastatore. Il diametro dell'elemento misurato dovrà quindi essere incrementato di un valore pari al diametro della sfera.

Nel caso in esame:

$\Phi_{pezzo}[mm]$	$\Phi_{punta}[mm]$	$\Phi_{traiettoria}[mm]$	$d [\frac{punti}{mm}]$	L [mm]	N
33	5	38	5	119.32	597

Tabella 15

7.1 Variazione dei parametri di scansione

Si effettuano diverse scansioni per analizzare l'effetto sui risultati finali. Il primo obiettivo è quello di ottimizzare il tempo ciclo in relazione alla qualità della misura. I risultati migliori, infatti, si ottengono con velocità basse, ma spesso è necessario cercare di adeguare il processo di misura ai ritmi del processo produttivo. I parametri delle scansioni effettuate, mantenendo $d=5$, sono mostrati nella seguente tabella:

Scansione	v [$\frac{mm}{s}$]	a [$\frac{mm^2}{s}$]
1	10	10
2	20	40
3	30	90
4	40	160

Tabella 16

Per assicurare che la macchina raggiunga la velocità richiesta è necessario imporre un adeguato valore di accelerazione.

Scansione	Errore [μm]	T [s]
1	7.6	14
2	7.9	7
3	8.4	5
4	9.3	4

Tabella 17

dove T è il tempo impiegato per effettuare la scansione. La variazione dell'errore e del tempo rispetto alla prima misura espressi in termini percentuali sono i seguenti:

Scansione	$\Delta Error$	ΔT
2	+4%	-50%
3	+10%	-64%
4	+22%	-71%

Tabella 18

Si osserva come nel passaggio dalla prima alla seconda scansione il tempo necessario per ottenere la misura si dimezza, con una variazione molto contenuta dell'errore di forma. L'adozione di una velocità di scansione pari a 20 mm/s può quindi essere ritenuta una scelta adeguata nell'ottica dell'ottimizzazione del tempo ciclo, mantenendo elevata la qualità della misura.

Nelle scansioni successive, a fronte di una riduzione ulteriore del tempo di misura, l'errore ottenuto inizia ad allontanarsi in modo sensibile rispetto ai risultati di partenza, con un valore che, nell'ultima scansione, risulta essere il 22% superiore rispetto a quello rilevato nella prima misura. In questi casi è necessario capire se una differenza di quasi 2 μm può essere accettata, minimizzando il tempo ciclo a fronte di una qualità della misura inferiore.

È possibile condurre un'ulteriore analisi sull'effetto della densità di punti rilevati sui risultati finali. Un maggior numero di punti rilevati garantisce una maggiore qualità di misura. Tuttavia, un valore di $N=597$ è sufficiente e un incremento della densità di punti non consentirebbe di apprezzare nessuna variazione sui risultati finali. Si può invece osservare come variano i risultati di partenza scegliendo un valore di densità pari a 2.

Le nuove condizioni sono le seguenti:

$\Phi_{pezzo} [mm]$	$\Phi_{punta} [mm]$	$\Phi_{traiettoria} [mm]$	$d [\frac{punti}{mm}]$	L [mm]	N
33	5	38	2	119.32	239

Tabella 19

Nella tabella seguente sono sintetizzati i risultati ottenuti al variare della velocità, mantenendo $d=2$:

Scansione	$v [\frac{mm}{s}]$	$a [\frac{mm^2}{s}]$	Errore [μm]	T [s]
1	10	10	8.2	14
2	20	40	8.9	7
3	30	90	8.9	5
4	40	160	9.2	4

Tabella 20

La deviazione del profilo rilevato rispetto al cerchio di riferimento ottenuto con il metodo dei minimi quadrati è riportata nella figura seguente:

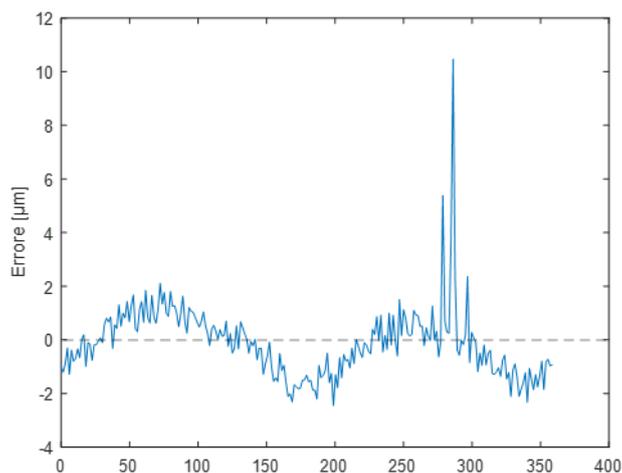


Figura 42: Deviazione rispetto al cerchio di riferimento dei minimi quadrati

Si riporta il risultato della scansione senza l'applicazione dei filtri:

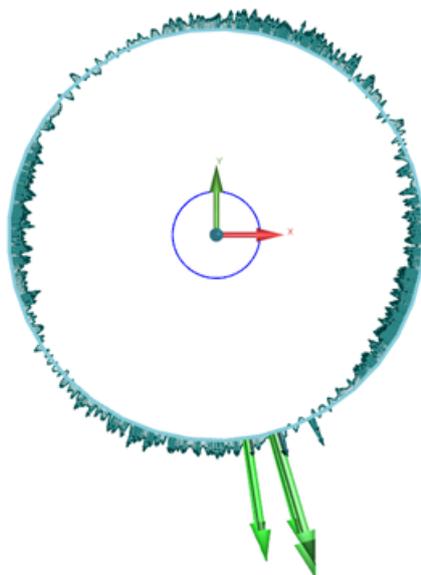


Figura 43

Risulta evidente la presenza di punti anomali e di variazioni con frequenza molto alta, che sono legate alle imperfezioni della superficie.

L'applicazione del filtro gaussiano consente di separare l'errore di forma dalle irregolarità dovute alla rugosità del pezzo:

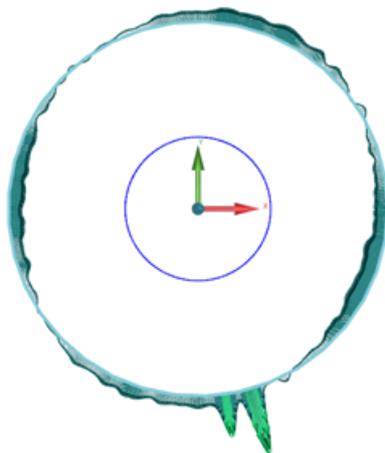


Figura 44

La scelta di un coefficiente moltiplicativo della deviazione standard pari a 2 consente un'ulteriore elaborazione dei risultati:

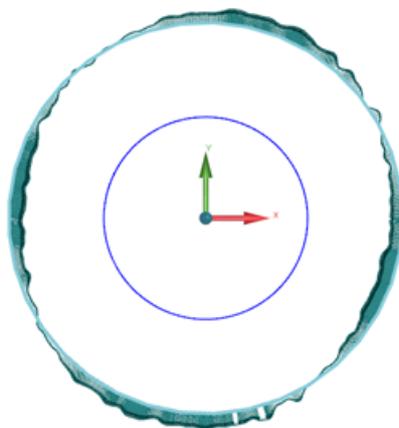


Figura 45

Si analizza l'effetto dell'applicazione di algoritmi diversi sul risultato finale. La scansione presa in considerazione per effettuare questo confronto è caratterizzata dai seguenti parametri:

$v \left[\frac{mm}{s} \right]$	$a \left[\frac{mm^2}{s} \right]$	$d \left[\frac{punti}{mm} \right]$
10	10	5

Tabella 21

Il filtro applicato è un filtro gaussiano (50 UPR).

Come nel caso della misura per punti, è possibile applicare i quattro diversi algoritmi per l'individuazione del cerchio di riferimento.

Di seguito si riportano i quattro possibili cerchi di riferimento³:

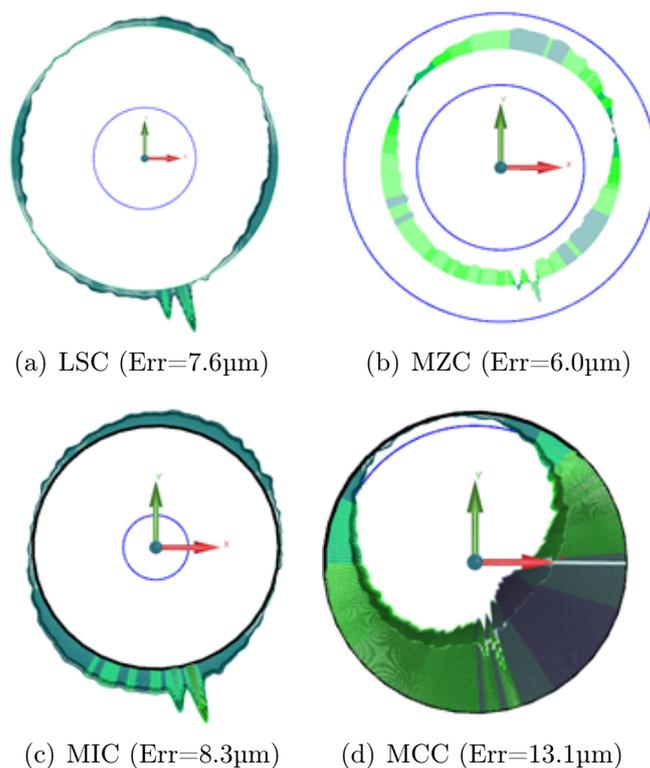


Figura 46

³Si ricorda che il massimo cerchio inscritto si utilizza quando si analizza il diametro interno di un pezzo. In questo caso tale risultato è riportato soltanto per effettuare un confronto numerico tra i valori che si ottengono utilizzando i diversi approcci.

8 Misura della cilindricità

Per effettuare le misure di cilindricità è possibile seguire due modalità:

- Definizione di un certo numero di sezioni lungo l'asse della feature considerata

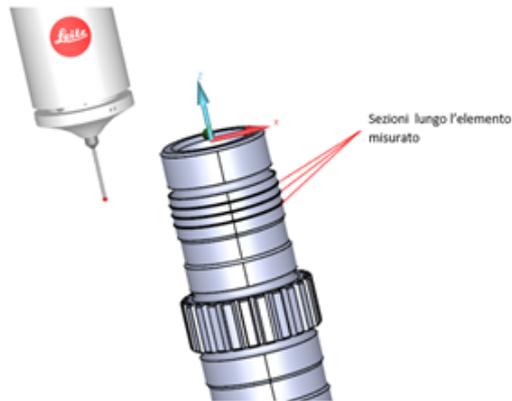


Figura 47: Definizione sezioni

- Definizione di una traiettoria elicoidale seguita dal sistema tastatore

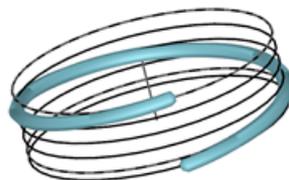


Figura 48: Definizione traiettoria elicoidale

Nonostante consenta di ridurre il tempo necessario per l'esecuzione della misurazione, è possibile affermare che la misura della cilindricità attraverso l'utilizzo di una traiettoria elicoidale porta ad ottenere dei risultati meno accurati. L'impiego di questa modalità infatti porta ad acquisire una quantità di informazioni inferiore a quella per sezioni. Considerando la feature analizzata, si mette in evidenza il fatto che, data la sua lunghezza contenuta, ci si aspetta un errore di rettilineità dell'asse molto limitato; inoltre, l'errore di rotondità sarà molto simile per ciascuna delle sezioni considerate. In casi come questo, la misura della circolarità in corrispondenza di una sola sezione potrebbe essere sufficiente a garantire che l'errore di forma non comprometta il funzionamento.

Di seguito vengono presentati i risultati ottenuti con il software PC-DMIS.

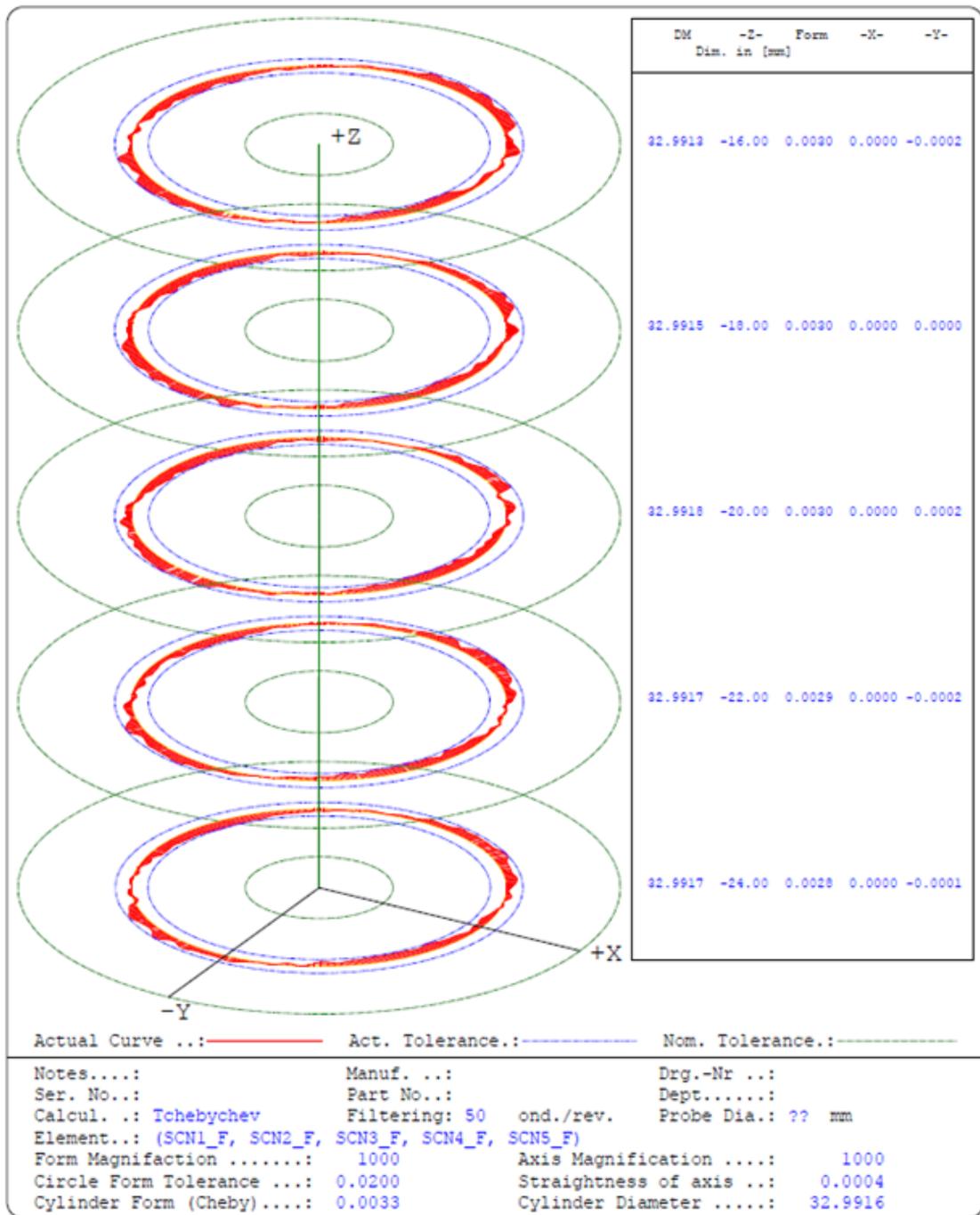


Figura 49: Risultati cilindricità in PC-DMIS

È possibile riportare anche i grafici topografici ricavati attraverso il software QUINDOS. Per apprezzare l'errore di cilindricità il grafico può essere ruotato intorno all'asse Z:

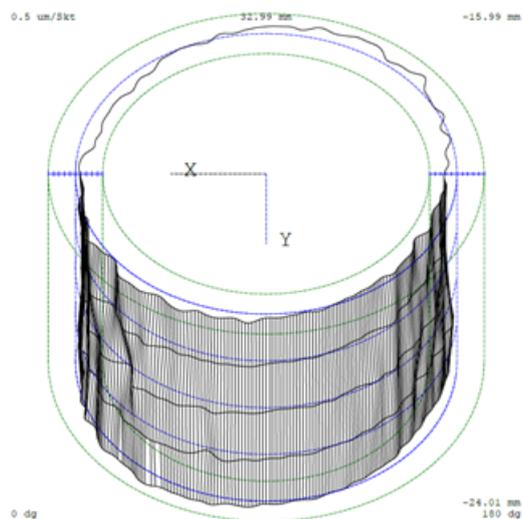


Figura 50: Risultati cilindricità in QUINDOS (a)

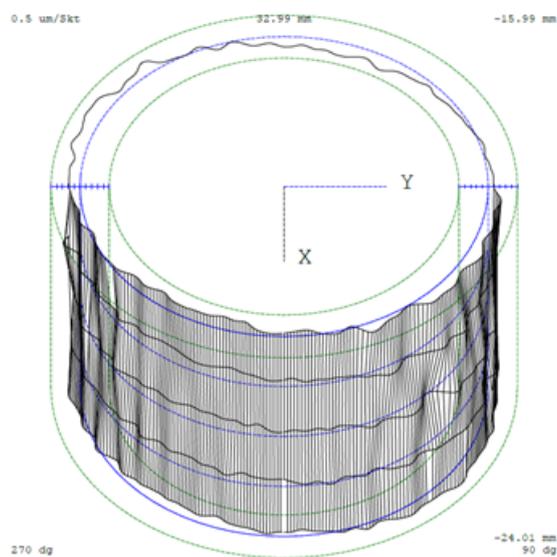


Figura 51: Risultati cilindricità in QUINDOS (b)

9 Conclusioni

Attraverso l'elaborazione dei punti rilevati tramite la macchina di misura a coordinate è stato possibile esaminare le differenze nell'applicazione dei diversi algoritmi per la definizione del cerchio di riferimento. È stato possibile osservare come l'utilizzo del cerchio di Chebyshev minimizzi la stima dell'errore di circolarità. Le deviazioni massima e minima sono in questo caso uguali in modulo e di segno opposto. Inoltre, sono stati presentati ulteriori algoritmi per la definizione del cerchio di minima zona, come l'approccio geometrico basato sul minimo cerchio circoscritto. Lo sviluppo di questo metodo e la sua applicazione ai dati rilevati mediante la misura in scansione hanno permesso di evidenziare la coerenza dei risultati ottenuti con quelli ricavati automaticamente attraverso il software di misura PC-DMIS. Analogamente, la formulazione matematica del cerchio dei minimi quadrati associata alle coordinate dei punti rilevati, ha consentito di individuare un cerchio gaussiano, il cui centro e raggio corrispondono a quelli ottenuti in maniera automatica in laboratorio. L'obiettivo delle misure in scansione era quello di comprendere quale fosse il miglior compromesso fra la velocità di scansione (e quindi il tempo necessario per l'esecuzione del ciclo di misura) e la qualità delle misure effettuate. L'analisi dei risultati ottenuti ha messo in evidenza che, per il pezzo in esame, una velocità di scansione intorno ai 40 mm/s garantisce un'elevata qualità della misura, minimizzando il tempo ciclo. Un ulteriore parametro analizzato è il numero di punti rilevati. In questo caso è naturale aspettarsi una maggiore affidabilità dei risultati ottenuti al crescere dei punti utilizzati nel corso della misurazione ed è sempre di fondamentale importanza seguire le indicazioni della normativa. Nel caso delle misure in scansione sono stati confrontati i dati ottenuti con valori di densità di 2 e 5 punti/mm. È comunque possibile affermare che un valore di densità superiore a 5 punti/mm non fornisca nessun valore aggiunto alle misure effettuate e quindi i risultati si mantengono stabili da un certo valore di densità in poi.

Le caratteristiche dell'albero in esame, che presenta dei difetti sulla superficie, hanno permesso di rilevare dei punti anomali, i quali sono stati opportunamente elaborati attraverso l'applicazione di un filtro sigma. La scelta di un opportuno coefficiente moltiplicativo della deviazione standard consente di eliminare i punti isolati. L'applicazione di un filtro di questo tipo è estremamente importante nella stima dell'errore di circolarità. Considerando l'analisi sul cerchio dei minimi quadrati ottenuto con la misura per punti, si osserva come l'errore di circolarità passi da 6.1 μm a 1.9 μm a seguito dell'applicazione del filtro.

Sono stati evidenziati i concetti teorici di base per l'applicazione del filtro gaussiano. Spostandosi nel dominio delle frequenze, l'applicazione di questo filtro si riduce a una semplice moltiplicazione. Per visualizzare graficamente l'effetto del filtro gaussiano ed evidenziare possibili effetti indesiderati, i risultati della misura in scansione sono stati riportati in Matlab. In questo modo risultano evidenti gli effetti di bordo in corrispondenza di picchi e valli, che potrebbero essere risolti attraverso l'applicazione di un filtro non lineare, il filtro gaussiano robusto. Inoltre, bisogna evidenziare l'importanza delle indicazioni fornite dalla normativa. Bisogna infatti impedire distorsioni del profilo di rotondità per via dell'influenza della punta dello stilo. Per questo motivo, il valore della frequenza di taglio deve essere correlato al rapporto fra il diametro della punta del tastatore e il diametro del pezzo.

L'errore di cilindricità può essere visto come un'estensione dell'errore di circolarità lungo l'asse della feature misurata. Le caratteristiche della tolleranza di cilindricità sono molto simili a quelle della tolleranza di circolarità. Anche in questo caso è necessario definire un elemento di riferimento (in questo caso un cilindro) e per farlo è possibile seguire i 4 metodi presentati con la misura di rotondità. Inoltre, è necessario elaborare i dati attraverso l'applicazione del filtro gaussiano e del filtro sigma.

Possibili sviluppi di ricerca sono le analisi degli effetti termici sulle misure effettuate. È necessario tener conto di questi effetti già nella qualifica del tastatore. Qualunque ambiente è affetto da variazioni termiche. Le CMM sono composte da molte parti, di differente massa e capacità termica. I componenti più leggeri sono più pronti nella reazione termica, e quindi sensibili a cicli termici anche veloci. Fra questi, probabilmente quello con costante di tempo più breve è il sistema stilo, composto da strutture esili, di metallo conduttore e con buona superficie di scambio.

A Determinazione cerchio dei minimi quadrati

Dato un set di punti in $R^2\{(x_i, y_i) | 0 \leq i \leq N\}$, si vuole trovare il cerchio che meglio approssima l'insieme di punti, usando il metodo dei minimi quadrati. Si definiscono:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i \text{ e } \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_i y_i \quad (\text{A.1})$$

Si pone $u_i = x_i - \bar{x}, v_i = y_i - \bar{y}$ per $0 \leq i \leq N$. Si risolve il problema nelle coordinate (u, v) per tornare poi di nuovo alle coordinate (x, y) .

Si indica con (u_c, v_c) il centro del cerchio e con R il raggio.

Si intende minimizzare la somma $S = \sum_i (g(u_i, v_i))^2$, dove $g(u, v) = (u - u_c)^2 + (v - v_c)^2 - \alpha$, posto $\alpha = R^2$.

Per farlo è necessario differenziare $S(\alpha, u_c, v_c)$.

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 2 \sum_i g(u_i, v_i) \frac{\partial g}{\partial \alpha}(u_i, v_i) = -2 \sum_i g(u_i, v_i) \quad (\text{A.2})$$

Quindi $\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 0$ se:

$$\sum_i g(u_i, v_i) = 0 \quad (\text{A.3})$$

Continuando con le altre derivate parziali si ha:

$$\frac{\partial S}{\partial u_c} = -4 \sum_i u_i g(u_i, v_i) + 4u_c \sum_i g(u_i, v_i) \quad (\text{A.4})$$

Sfruttando l'equazione (A.3) si ha $\frac{\partial S}{\partial u_c} = 0$ se:

$$\sum_i u_i g(u_i, v_i) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Analogamente, $\frac{\partial S}{\partial v_c} = 0$ se:

$$\sum_i v_i g(u_i, v_i) = 0 \quad (\text{A.6})$$

Espandendo l'equazione (A.5):

$$\sum_i u_i [u_i^2 - 2u_i u_c + u_c^2 + v_i^2 - 2v_i v_c + v_c^2 - \alpha] = 0 \quad (\text{A.7})$$

Se si definiscono $S_u = \sum_i u_i$, $S_{uu} = \sum_i u_i^2$ ecc., è possibile riscrivere l'equazione (A.7) come segue:

$$u_c S_{uu} + v_c S_{uv} = \frac{1}{2} (S_{uuu} + S_{uvv}) \quad (\text{A.8})$$

Analogamente, espandendo l'equazione (A.6) si ha:

$$u_c S_{uv} + v_c S_{vv} = \frac{1}{2} (S_{vvv} + S_{vuu}) \quad (\text{A.9})$$

Risolvendo il sistema costituito dalle equazioni (A.8) e (A.9) si individuano le coordinate del centro (u_c, v_c) . Le coordinate del centro nel sistema di partenza sono $(x_c, y_c) = (u_c, v_c) + (\bar{x}, \bar{y})$. Per trovare il raggio è possibile sfruttare l'equazione (18):

$$\alpha = u_c^2 + v_c^2 + \frac{S_{uu} + S_{vv}}{N} \quad (\text{A.10})$$

e ovviamente $R = \sqrt{\alpha}$. A questo punto, è possibile prendere in considerazione i punti rilevati con la macchina di misura per individuare il cerchio dei minimi quadrati.

I punti individuati sono i seguenti:

i	$x_i[mm]$	$y_i[mm]$	$u_i[mm]$	$v_i[mm]$
1	16.501	0.009	16.496	0.003
2	15.074	6.719	15.070	6.713
3	11.037	12.264	11.033	12.258
4	5.096	15.695	5.091	15.690
5	-1.710	16.412	-1.714	16.406
6	-8.235	14.299	-8.239	14.293
7	-13.340	9.710	-13.350	9.704
8	-16.140	3.435	-16.140	3.429
9	-16.140	-3.426	-16.140	-3.431
10	-13.350	-9.700	-13.350	-9.706
11	-8.238	-14.290	-8.243	-14.300
12	-1.715	-16.400	-1.719	-16.410
13	5.099	-15.690	5.094	-15.690
14	11.045	-12.250	11.041	-12.260
15	15.073	-6.699	15.069	-6.705

Tabella 22

B Calcolo deviazioni rispetto ai cerchi di riferimento: misura per punti

Si riporta il codice Matlab per il calcolo delle deviazioni dei 15 punti rilevati con la misura punti rispetto ai 4 cerchi di riferimento:

```
% Ciclo di misura di rotondità
% Misura per punti
clear
close all
%% Coordinate punti rilevati
x=[16.50071 15.07427 11.03688 5.09567 -1.70965 -8.23499 -13.34098 -16.13803 -16.13786 -13.34596 -8.23839 -1.71499 5.09869 11.0
y=[0.00884 6.71858 12.26385 15.69540 16.41225 14.29897 9.70977 3.43528 -3.42552 -9.7 -14.28953 -16.40422 -15.68559 -12.25139
r=sqrt(x.^2+y.^2);
r=(r-16.5)*700+16.5; %Per apprezzare lo scostamento dalla posizione
                    %nominale, la deviazione è moltiplicata per 700
%% Posizione angolare punti rilevati
theta=deg2rad(24);
thetav=[theta,2*theta,3*theta,4*theta,5*theta,6*theta,7*theta,8*theta,9*theta,10*theta,11*theta,12*theta,13*theta,14*theta,15*
%% Grafico
polarplot(thetav(1),r(1),'.',thetav(2),r(2),'.',thetav(3),r(3),'.',thetav(4),r(4),'.',thetav(5),r(5),'.',thetav(6),r(6),'.',th
hold on
polarplot(linspace(0,2*pi,500),16.5,','Color','k','MarkerSize',4)
ang=deg2rad(linspace(0,336,15)); %Posizione angolare punti di riferimento

%% Cerchio minimo circoscritto
xmq2=16.50122*cos(ang)+0.002;
ymq2=16.50122*sin(ang)+0.00165;
rmq2=sqrt(xmq2.^2+ymq2.^2);
z2=r-rmq2; %Deviazione punti rilevati rispetto al cerchio di riferimento

%% Cerchio massimo inscritto
xmq3=16.49694*cos(ang)-0.00119;
ymq3=16.49694*sin(ang)+0.00374;
rmq3=sqrt(xmq3.^2+ymq3.^2);
z3=r-rmq3; %Deviazione punti rilevati rispetto al cerchio di riferimento

%% Cerchio minimi quadrati
xmq4=16.498305*cos(ang)+0.00012;
ymq4=16.498305*sin(ang)+0.00384;
rmq4=sqrt(xmq4.^2+ymq4.^2);
z4=r-rmq4; %Deviazione punti rilevati rispetto al cerchio di riferimento

%% Cerchio Chebyshev
xmq5=16.498565*cos(ang)+0.0009;
ymq5=16.498565*sin(ang)+0.00355;
rmq5=sqrt(xmq5.^2+ymq5.^2);
z5=r-rmq5; %Deviazione punti rilevati rispetto al cerchio di riferimento

%% Cerchio minimi quadrati sigma 2
xmq6=16.4975*cos(ang)-0.00077;
ymq6=16.4975*sin(ang)+0.00376;
rmq6=sqrt(xmq6.^2+ymq6.^2);
z6=r-rmq6; %Deviazione punti rilevati rispetto al cerchio di riferimento
```

Riferimenti bibliografici

- [1] **Balsamo A.**, Il sistema tastatore a contatto: Errori, cause, consigli, Probing, N° 21 2014, pp 10-15
- [2] **Balsamo A.**, Filtraggio: concetti fondamentali (UNI EN ISO 16610-1), InteRSeC, 2017
- [3] **Bertero M., Boccacci P.**, Elaborazione di segnali e immagini
- [4] **Bullock R.**, Least-Squares Circle Fit, 2017
- [5] **Hexagon Manufacturing Intelligence**, PC-DMIS CMM Manual for Version 2021.1, 2021
- [6] **Hexagon Manufacturing Intelligence**, GLOBAL manuale Utente, pag. 13
- [7] **Iacovelli G., Rosi G.**, La trasformata di Fourier, 2012, pp 1-6
- [8] **Li Xiuming, Zhang Jingcai and Liu Hongqi**, Determination of the minimum zone circle based on the minimum circumscribed circle
- [9] **Malagola G., Ponterio A.**, La metrologia dimensionale per l'industria meccanica, Augusta, 2004, pp 41-42, pp 143-161, pp 193-197, pp 219-221
- [10] **Peng Zheng, Dongliang Liu, Fengxia Zhao, Linna Zhang**, Statistical Evaluation Method for Cylindricity Deviation Using Local Least Squares Cylinder, 2019, pp 1348-1350
- [11] **Pugliese M.**, Metrologia delle superfici, InteRSeC, 2017
- [12] **Tornincasa S.**, Come misurare la circolarità/rotondità
- [13] **Tornincasa S.**, Technical Drawing for Product Design, Springer, 2021, pp 17-99, pp 256-273
- [14] **Velling A.**, Cylindricity Explained, 2021

Ringraziamenti

Dedico questo spazio alle persone che hanno contribuito, con il loro supporto, alla realizzazione di questo elaborato. Desidero ringraziare innanzitutto il relatore di questa tesi, il Professor Stefano Tornincasa, per la disponibilità e l'attenzione dimostrate durante la stesura del lavoro, oltre che per il piacere e il coinvolgimento provati all'ascolto di ogni sua lezione.

Un ringraziamento speciale va al mio tutor, l'Ingegnere Davide Serra, per la sua pazienza nel chiarire ogni mio dubbio e per il suo aiuto nell'attività di tirocinio, presso l'azienda Hexagon.

Ringrazio Giuseppe, con cui ho condiviso la mia prima esperienza in azienda, per i tanti momenti di confronto e per tutti i momenti di spensieratezza.

Ringrazio i miei genitori, che mi sostengono costantemente e a cui dedico questo lavoro.