

INTERIM CHECK DELLE MACCHINE UTENSILI

0. INTRODUZIONE

Un servizio molto diffuso che la STANIMUC svolge normalmente nelle aziende è la verifica periodica, o non periodica, dello stato di salute del parco macchine utensili in esercizio, siano esse molte o poche, misurando la precisione dell'interpolazione circolare nei diversi piani coordinati con il ball bar. La STANIMUC dispone dei diversi modelli di ball bar Renishaw, come il QC10 cablato, ed il QC20-W wireless, nonché della piastra in Zerodur per la calibrazione della lunghezza.



Figura 1 – Ball bar QC10 cablato



Figura 2 – Ball bar QC20-W wireless

1 FERMO MACCHINA

La rapidità di installazione dello strumento e dell'esecuzione fisica dei movimenti programmati è tale che in una giornata si possono analizzare mediamente tre macchine a tre assi lineari. Si può quindi considerare che una macchina sia impegnata nelle misure meno di tre ore.

Il tempo richiesto è funzione di diverse variabili. Può essere ridotto di molto se si esegue solo una misura per piano (XY, YZ, ZX). Inoltre, se non è la prima volta, la macchina viene presentata già attrezzata con un supporto (braccio, cubo, squadra) che permetta di piazzare facilmente lo zoccolino lato tavola in una posizione abbastanza centrata nel volume.

Si può invece dedicare più tempo se contemporaneamente alla misura si intraprendono anche azioni correttive, ad esempio sui guadagni degli azionamenti, sulla riduzione dei picchi dinamici di inversione o sulla compensazione del gioco d'inversione. In questo caso non si fa solo una fotografia della situazione, ma in poche ore, con correzioni successive, la macchina ne esce anche migliorata.

Analogamente si può dedicare più tempo se si interpola con più assi: su una alesatrice con più tavole roto-traslanti si può misurare l'interpolazione davanti ad ogni tavola, o su una macchina con più teste su una traversa si può misurare con ogni testa.

2. CONDIZIONI DI INSTALLAZIONE E DI FUNZIONAMENTO

2.1 Macchina nuova

Normalmente durante l'installazione la precisione dell'interpolazione circolare si misura dopo aver effettuato due controlli fondamentali, i cui risultati influiscono direttamente sul suo comportamento.

Il primo è il collaudo geometrico, con il quale si verifica che errori come quelli di rettilineità ed ortogonalità degli assi siano minimizzati, oltre a quelli angolari, che possono dar luogo all'errore di Abbe.

Il secondo controllo è la misura e contemporanea compensazione degli errori di passo degli assi, in termini di precisione, ripetibilità ed inversione, minimizzandoli in questo caso con la compensazione software della parte sistematica dell'errore. La ripetibilità, ossia la parte casuale dell'errore non è governabile numericamente, ma richiede eventuali ritocchi meccanici.

2.2 Macchina in esercizio

Una fotografia istantanea abbastanza completa del comportamento della macchina si può ottenere eseguendo, come minimo, le misure nei tre piani mediani del volume parallelepipedo disponibile. In ogni piano conviene utilizzare il diametro massimo consentito dall'asse più corto: ad esempio, se gli assi interpolanti sono lunghi 700 mm e 1000 mm, si può utilizzare un diametro di 600 mm.

La capacità diagnostica del software del ball bar fornisce poi molte informazioni sulle fonti di errore, come descritto nei paragrafi seguenti.

3. MANUTENZIONE E ARCHIVIO STORICO

Se alcune compensazioni o correzioni possono essere effettuate in contemporanea, come citato sopra, con lo strumento montato, altre possono richiedere interventi più lunghi, anche se non più complessi. Un errore di rettilineità può richiedere una ripresa del livellamento di un banco, così come un errore di perpendicolarità di un montante rispetto agli assi orizzontali. In questo caso si può programmare l'intervento in funzione delle necessità, separatamente dal controllo fatto.

Oppure la macchina si rivela in buono stato, o con un decadimento lieve delle caratteristiche geometriche e dinamiche, che non richiede ancora interventi correttivi o manutentivi. È però comunque utile costituire un archivio storico che consenta di osservare regolarmente l'evoluzione delle condizioni della macchina e programmare gli interventi prima di iniziare a produrre scarti, soprattutto nel caso di lavorazioni su materiali costosi.

4. ANALISI DEGLI ERRORI

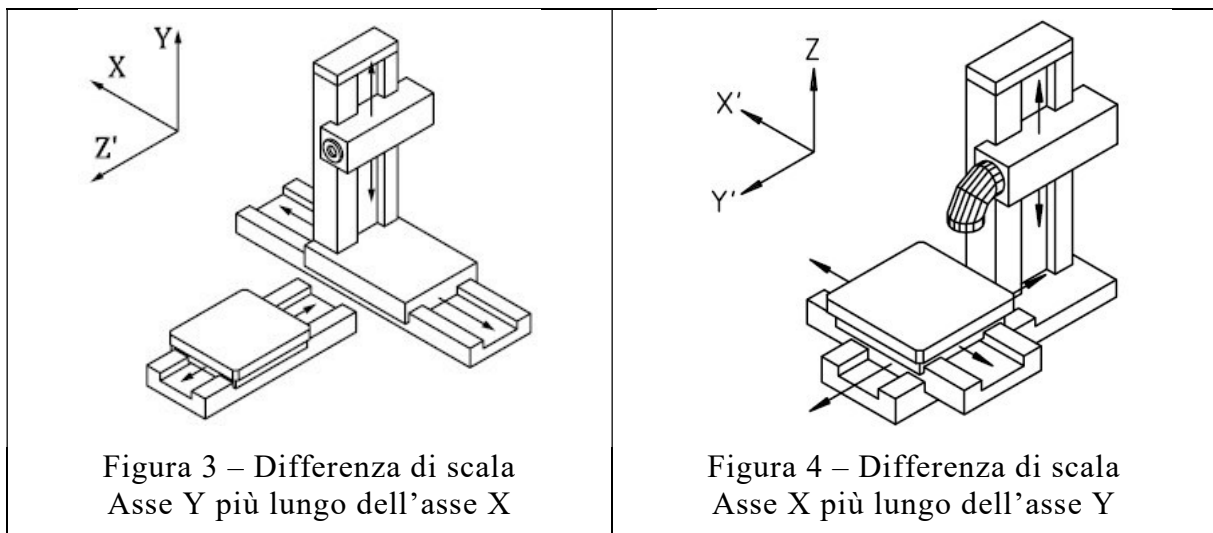
Il software dello strumento fornisce, in corrispondenza di ogni grafico, il peso percentuale dei diversi tipi di errore sull'errore complessivo di circolarità. Nei paragrafi seguenti sono descritti i principali errori rilevabili.

4.1 Differenza di scala

Per errore di scala si intende la differenza fra le lunghezze delle corse misurate sugli assi utilizzati per la prova. Può dipendere da imperfetta calibrazione dei trasduttori, da differenze di temperatura, o da errori angolari di beccheggio ed imbardata degli assi, che influenzano le lunghezze tramite l'errore di Abbe.

In generale su una alesatrice a montante mobile (figura 3), se le righe ottiche degli assi sono state calibrate tenendo conto della loro temperatura effettiva, non è raro trovare successivamente grafici di circolarità ellittici nel piano XY, con l'asse maggiore verticale, perché la temperatura dell'asse Y, scaldato da vicino dalla testa, è in generale maggiore di quella dell'asse X, la cui riga gode di un microclima più freddo in basso, in mezzo al banco, isolata dall'ambiente circostante dai ripari telescopici.

Analogamente, una tavola che si muove su una slitta a croce sopra un banco (figura 4), quando il baricentro della sua massa si sposta verso l'esterno del banco tende a subire una flessione (beccheggio) che per effetto dell'errore di Abbe allunga la sua corsa (asse X) rispetto alla corsa della slitta a croce (asse Y) che si muove rimanendo sempre appoggiata sul banco.



4.2 Servomotori

La rotazione nei due sensi può presentare andamenti ellittici con asse maggiore nel 1° e 3° quadrante in un senso e nel 2° e 4° nell'altro senso. In genere, la differenza di lunghezza dei due assi dell'ellisse cresce con l'aumentare della velocità di avanzamento, ciò che giustifica la ripetizione della medesima interpolazione anche a diverse velocità di avanzamento, con un limitato aumento di tempo. Tale condizione si presenta quando vi è un diverso guadagno dei comandi di posizione. La valutazione viene espressa in unità di tempo, e rappresenta il tempo in millisecondi con cui uno dei servomotori degli assi precede l'altro.

In generale questo comportamento può essere rapidamente compensato "in diretta" con lo strumento in macchina, lavorando sui guadagni degli assi.

La figura 5 mostra un caso di forte differenza di comportamento dinamico fra gli assi Z ed X, causa di un errore perfino maggiore dell'errore di ortogonalità, nonostante quest'ultimo sia abbastanza elevato.

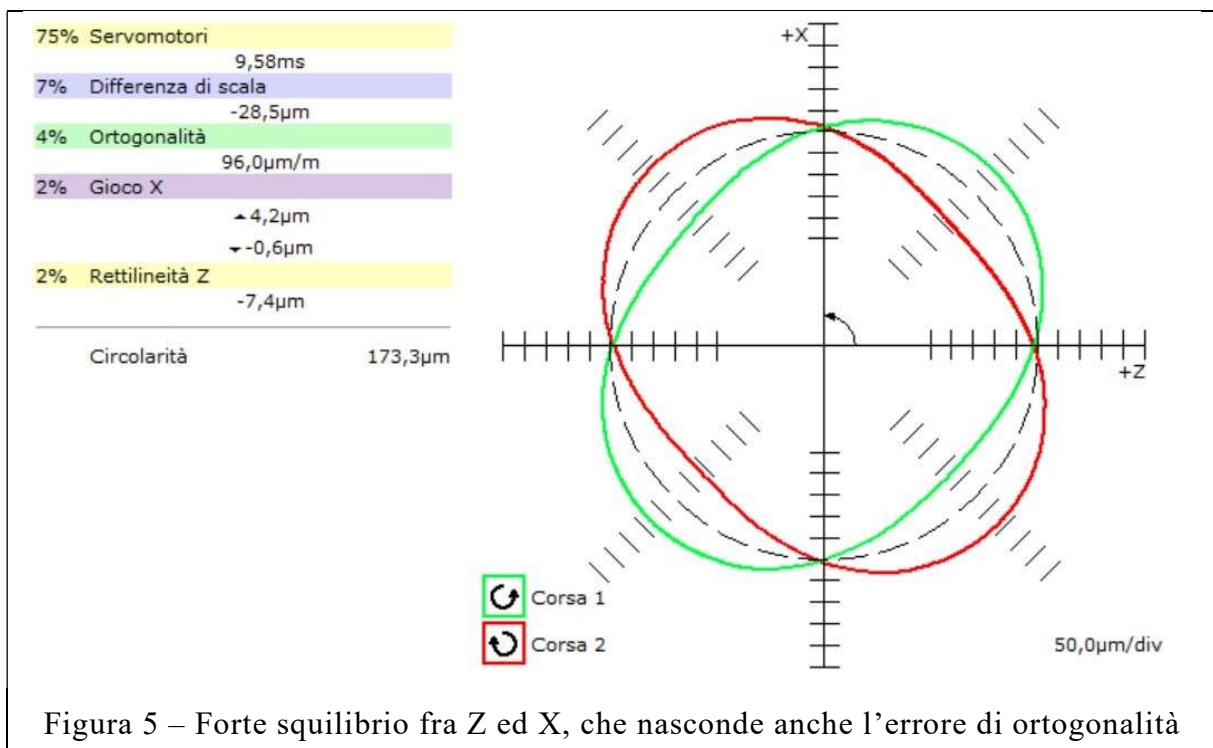


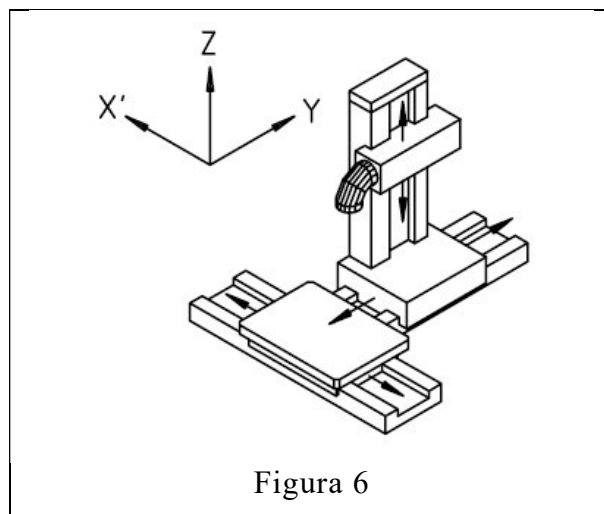
Figura 5 – Forte squilibrio fra Z ed X, che nasconde anche l'errore di ortogonalità

4.3 Scampanamento

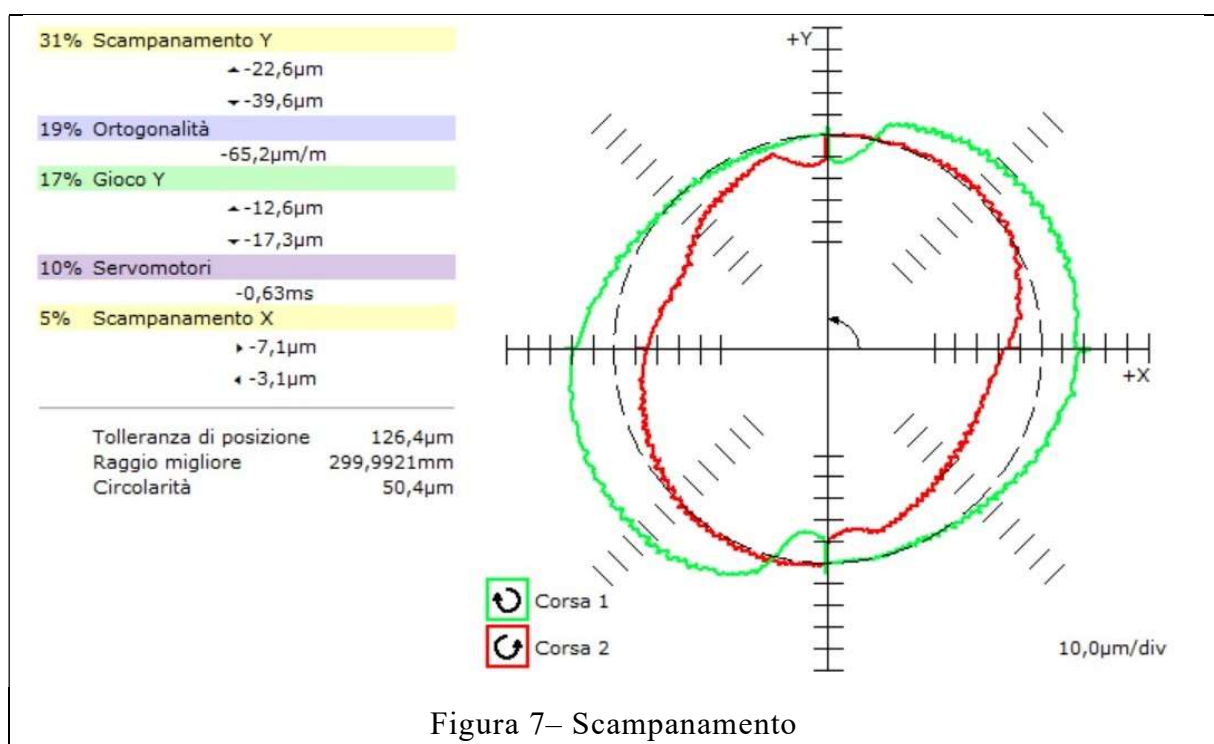
Il grafico può presentare una forma simmetrica simile a una pesca. Un tracciato compare all'interno dell'altro. Questo difetto, dipendente da un gioco trasversale di un asse rispetto alla direzione del moto, non è influenzato dalla velocità di avanzamento della macchina, ma dalla direzione.

Questo può accadere, ad esempio, se nel movimento di un asse si genera una coppia fra tiro della vite e resistenze al moto, per cui l'organo mobile tende a ruotare da una parte in un senso di moto e dalla parte opposta nel senso opposto. Si può verificare sia su assi verticali, sia su assi orizzontali.

Nella figura 6, se l'asse orizzontale Y subisce una rotazione orizzontale di imbardata fra i due sensi opposti di moto, la testa, molto sporgente in avanti, si sposta in senso X in due modi opposti, a destra in un senso ed a sinistra nel senso opposto.



La figura 7 mostra, insieme ad altri, un evidente errore di scampanamento. Il tracciato rosso anti-orario è sempre interno al tracciato verde orario. Quando l'asse Y si muove in senso positivo, il tracciato rimane più a sinistra (valori minori in X), e quando l'asse Y si muove in senso negativo il tracciato rimane più a destra (valori maggiori in X).



4.4 Picchi di inversione

Il tracciato può mostrare un breve picco all'inversione di un asse. Quando un asse si muove in una direzione e poi rallenta fino ad arrestarsi ed invertire il senso del moto, il movimento durante l'inversione non è fluido. Spesso le dimensioni del picco variano in funzione della velocità di avanzamento della traiettoria, riconfermando l'utilità della ripetizione della prova a diverse velocità di avanzamento. Le cause del picco possono essere molteplici.

- Il motore dell'asse applica un livello di coppia inadeguato sul punto di inversione del moto ed il fenomeno è dovuto al cambiamento di senso delle forze di attrito.
- I tempi di risposta dei servomotori della macchina non riescono a compensare il gioco di inversione. Ciò significa che la macchina non riesce a eseguire immediatamente la compensazione del gioco, provocando la perdita di controllo dell'asse per il tempo necessario a compensare.
- La risposta dei servomotori sul punto di inversione è insufficiente, provocando un breve ritardo nell'inversione del senso di moto.

La figura 8 mostra degli evidenti picchi di inversioni dinamiche, che nella figura 9 risultano eccessivamente compensati. Inoltre sull'asse X il comportamento è diverso nei due punti opposti.

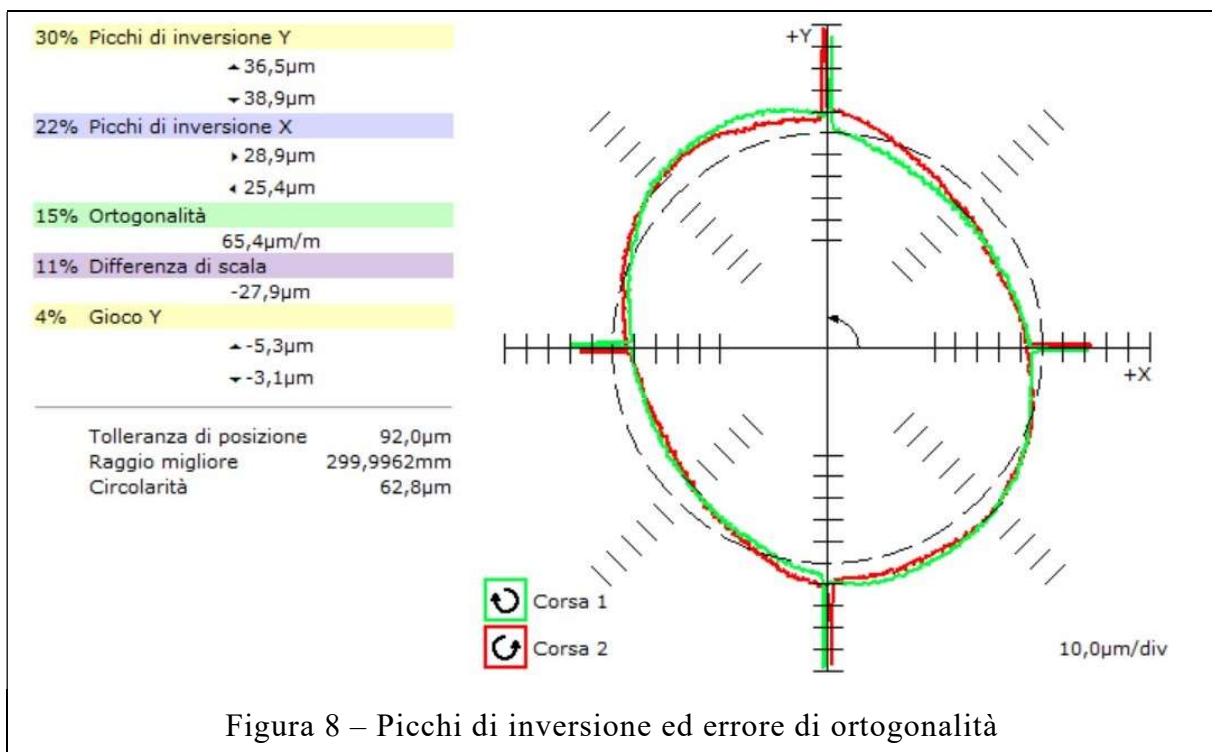
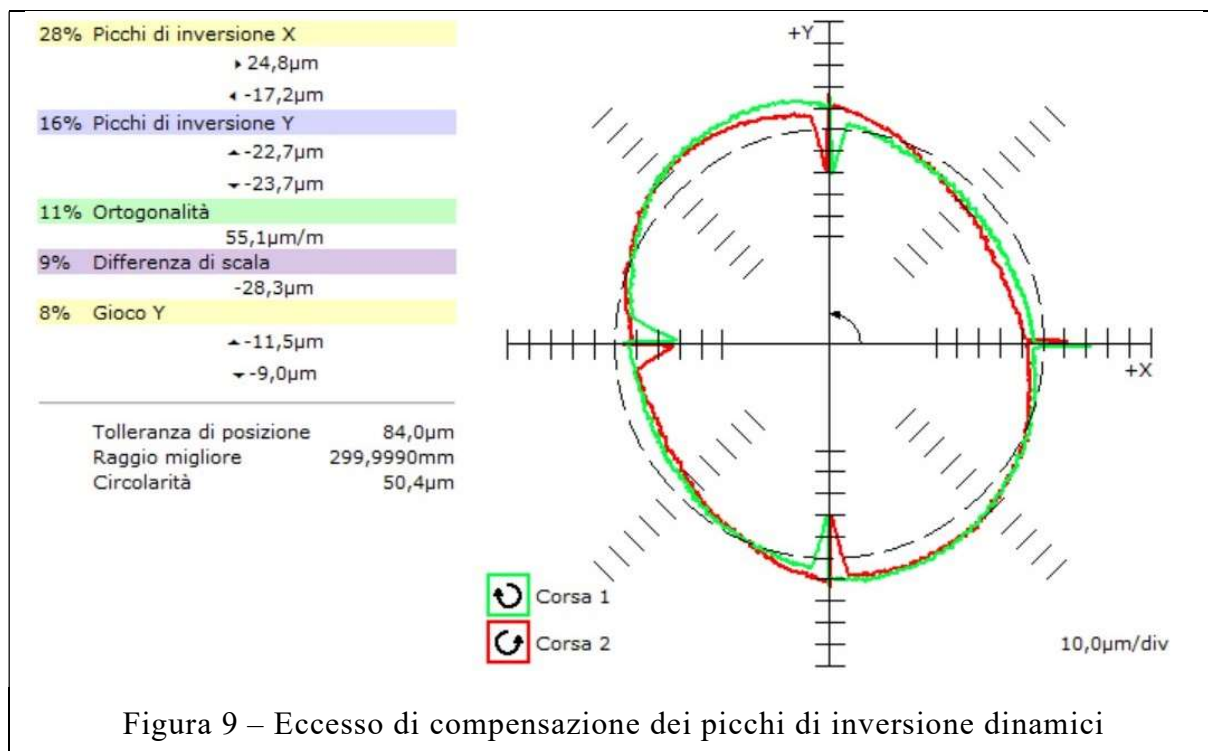


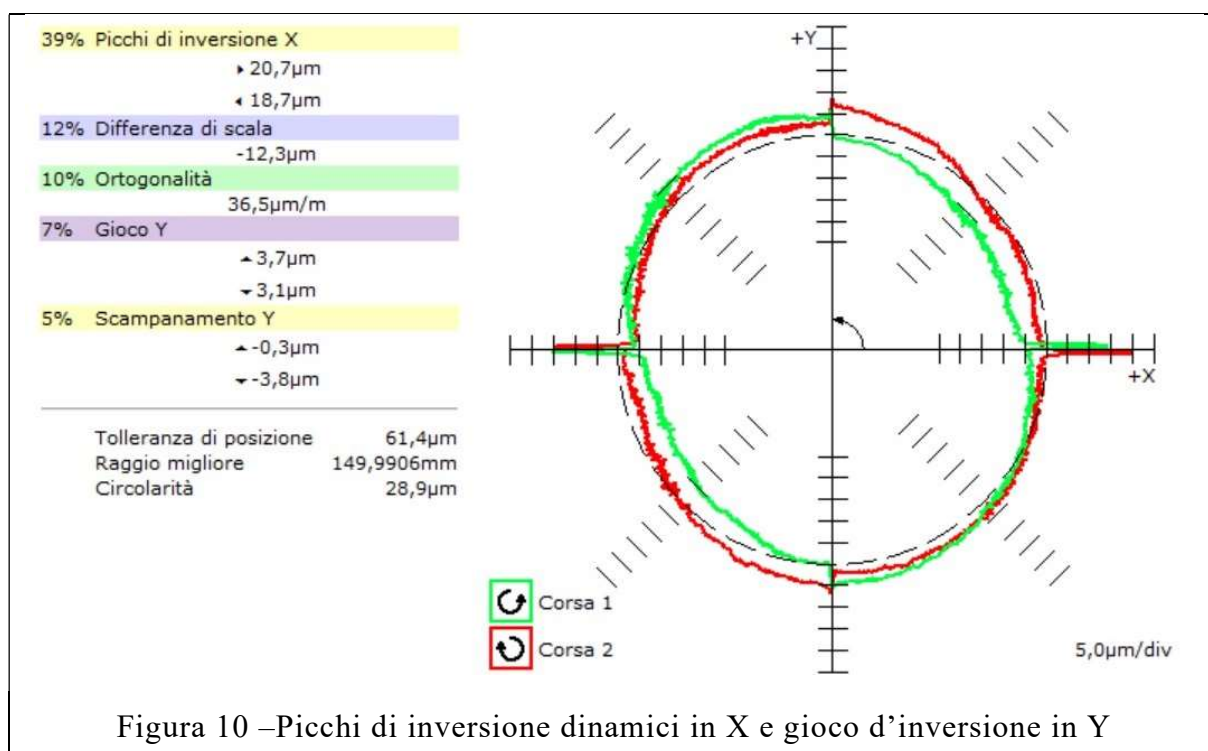
Figura 8 – Picchi di inversione ed errore di ortogonalità



4.5 Errore di inversione

Può dipendere dai giochi nella trasmissione dell'asse, dal gioco assiale di una vite a sfere, oppure da un gioco nelle guide o da altre cause meccaniche. Può essere positivo o negativo, ossia rappresentare una perdita di moto all'inversione, o al contrario una sovrapposizione delle corse nei due sensi, simile ad un eccesso di compensazione del gioco.

La figura 10 chiarisce la differenza di effetto fra i picchi di inversione dinamici (picchi sull'asse X) e l'errore d'inversione (gradini sull'asse Y).



Le figure 11 e 12 mostrano le due fasi della stessa misura, prima e dopo la compensazione dell'errore d'inversione sui due assi X ed Y. Se l'errore d'inversione è abbastanza costante su tutta la corsa di un asse la compensazione è immediata e risolutiva. Se è diverso da punto a punto la compensazione applicata è precisa ed efficace solo nella zona dell'interpolazione, ma poi diversa e meno valida in altri punti della corsa. Non è raro che nella stessa zona dell'interpolazione un asse abbia errori di inversione diversi nei due punti opposti, come evidenziato dalla didascalia della figura 11.

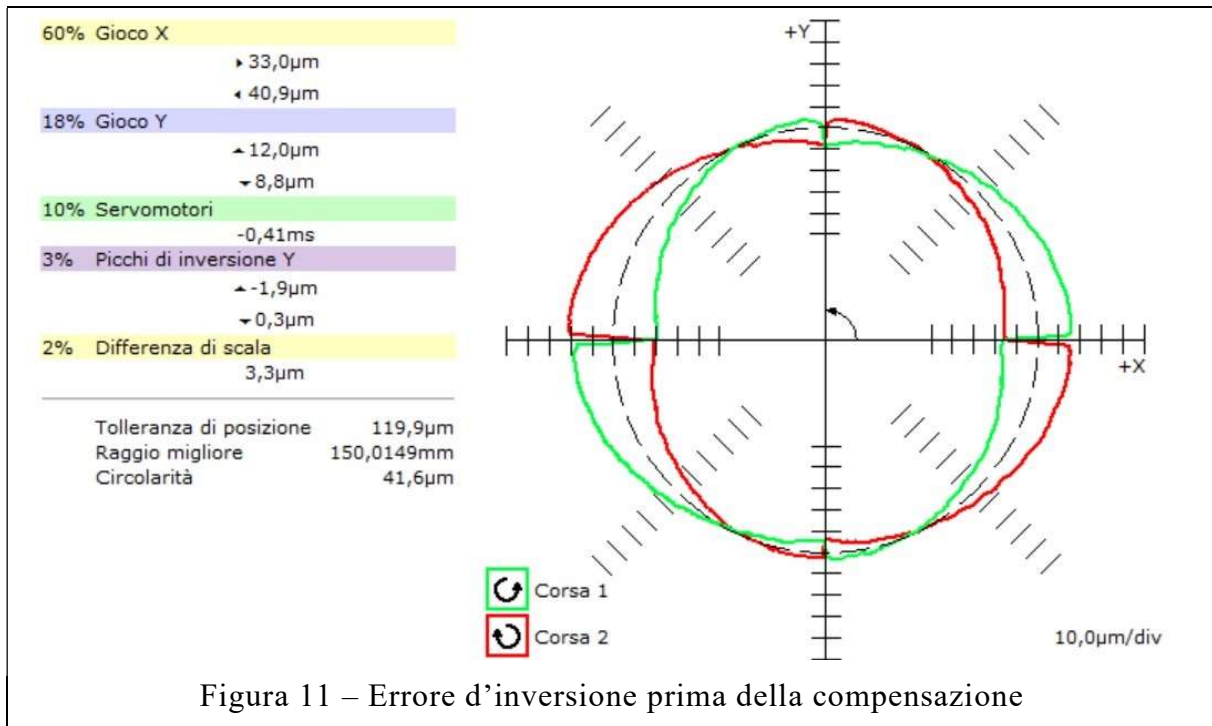


Figura 11 – Errore d'inversione prima della compensazione

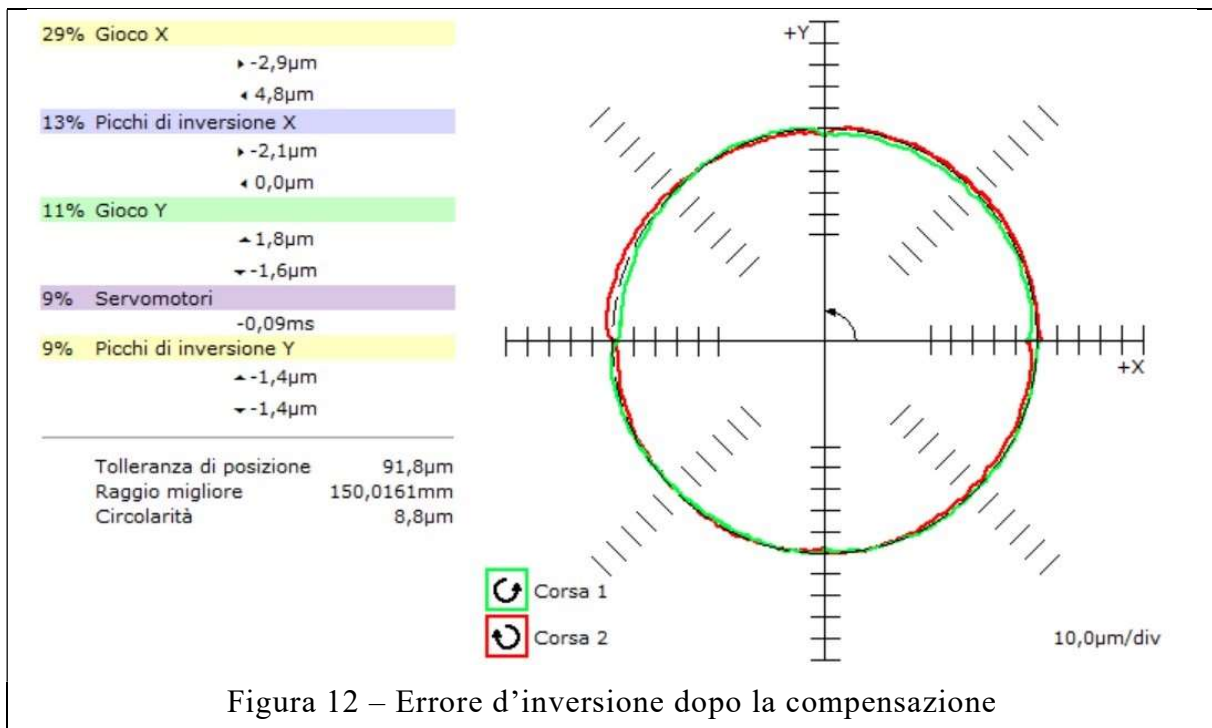


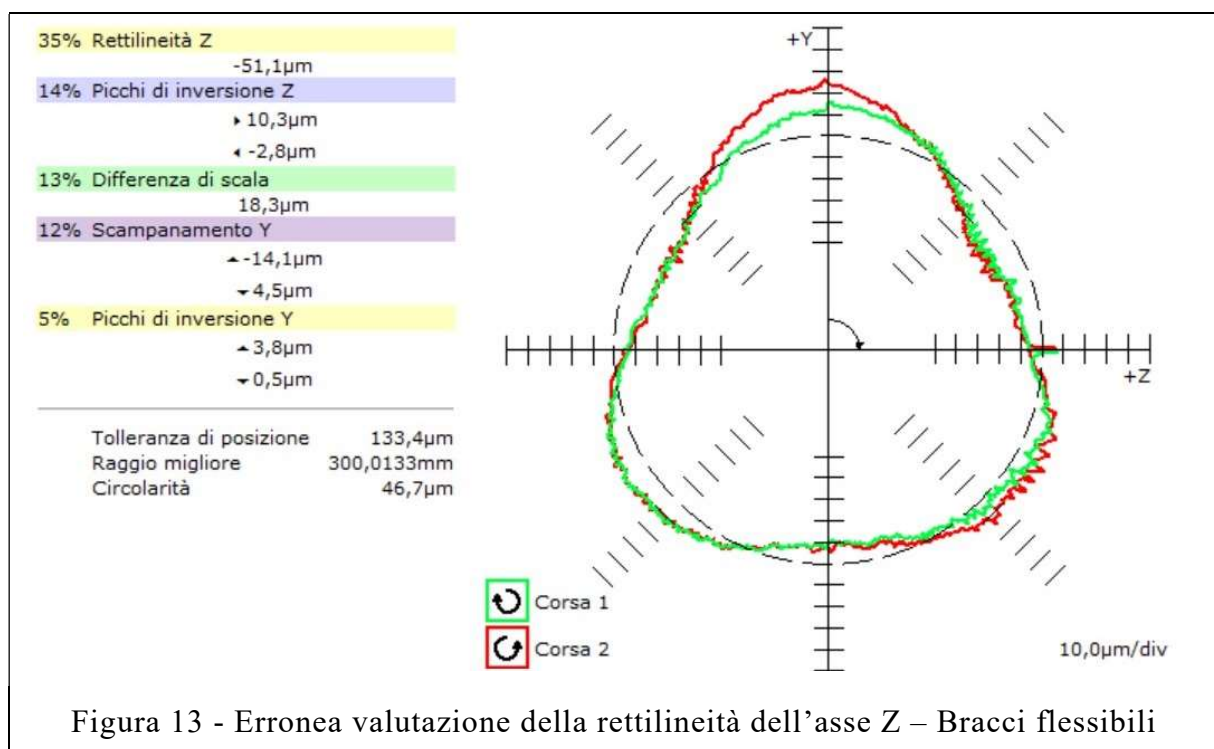
Figura 12 – Errore d'inversione dopo la compensazione

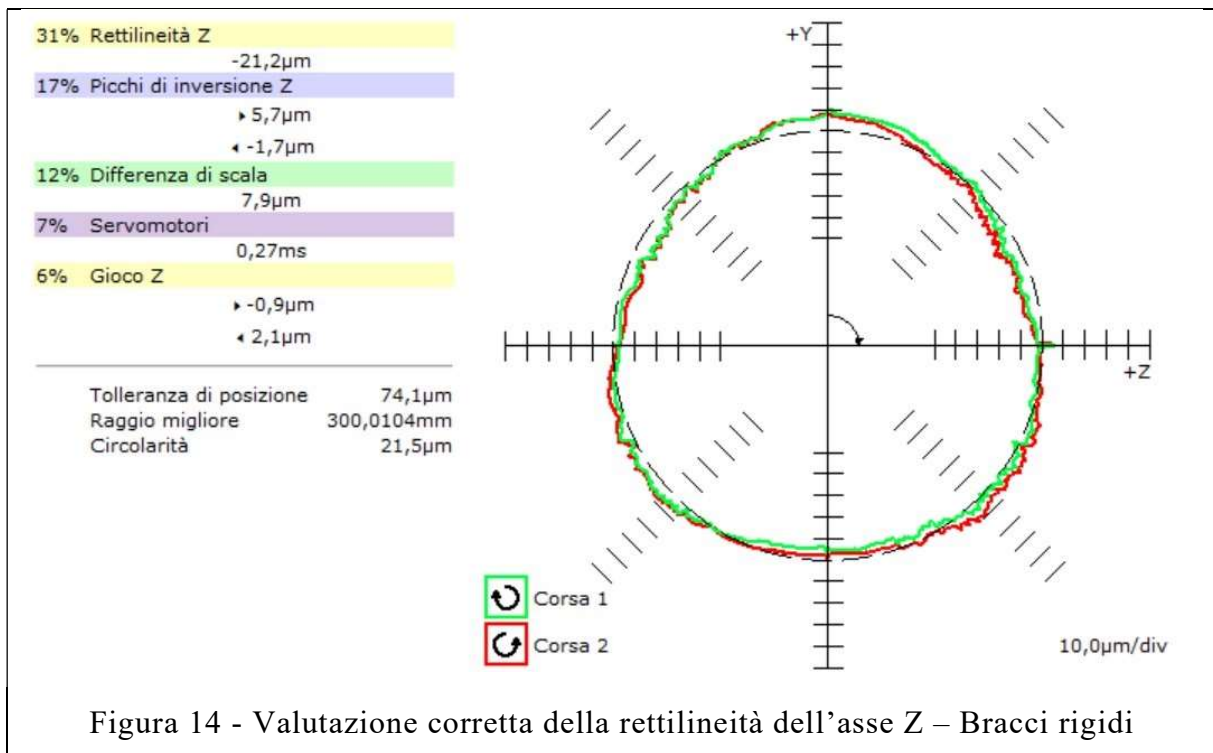
4.6 Rettilinearità

Un errore di rettilinearità di un asse sposta entrambi i poli dell'altro asse nello stesso senso, quindi uno verso l'esterno e l'altro verso l'interno. Il tracciato tende a diventare trilobato. La causa dell'errore è di natura geometrica, e di conseguenza l'errore è legato alla zona degli assi in cui viene eseguita la misura. In un'altra parte della corsa degli assi può essere diverso.

Poiché l'obiettivo dell'interim check è di evidenziare in tempi brevi molti errori (geometrici, statici, dinamici), si utilizza in ogni piano il massimo diametro possibile, come nel caso delle figure 13 e 14, dove si è misurato su un diametro di 600.

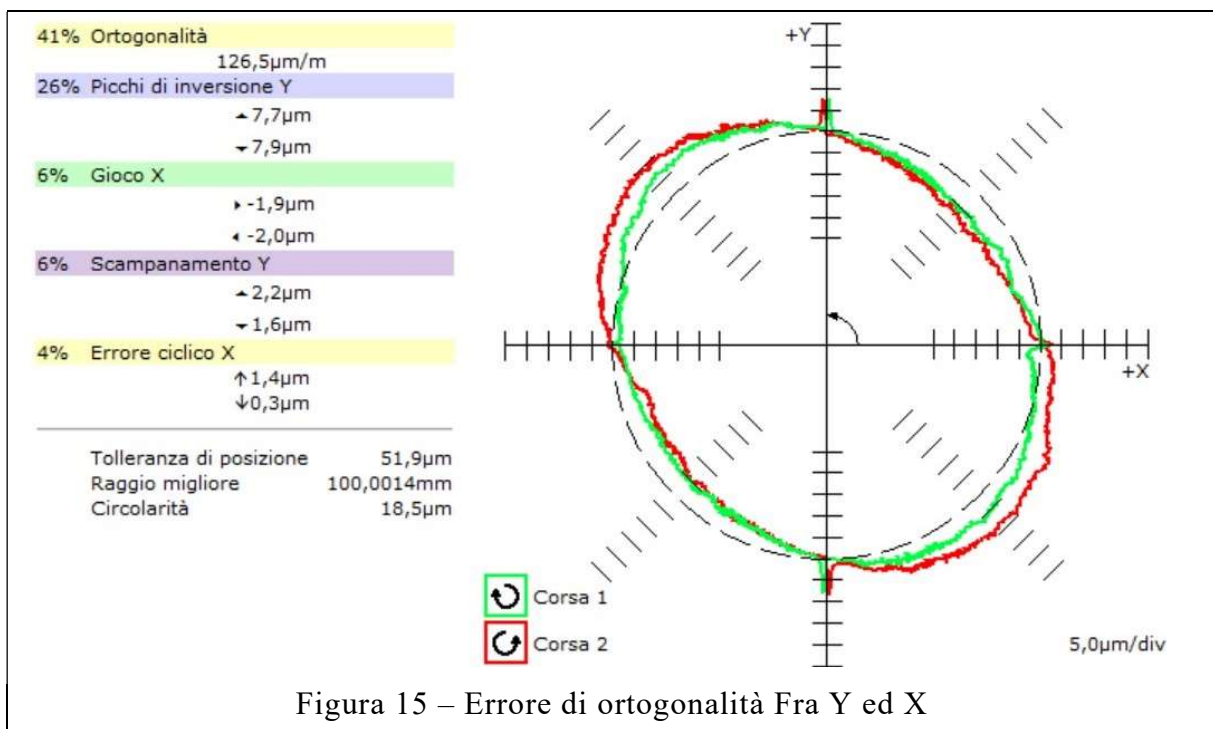
Si devono quindi impiegare bracci di sufficiente rigidità per montare gli zoccolini magnetici delle sfere. La figura 13 mostra un caso di erronea valutazione della rettilinearità dell'asse orizzontale Z dovuta alla flessione dei bracci, e la figura 14 mostra i risultati della stessa misura eseguita dopo aver sostituito i bracci con altri supporti più rigidi.





4.7 Ortogonalità

Il grafico presenta una forma ovale, con asse maggiore dei due tracciati sempre negli stessi quadranti in entrambi i sensi di rotazione dell'interpolazione, e fornisce anche il segno dell'errore, utile per intraprendere azioni correttive. La figura 15 mostra un esempio di errore di ortogonalità fra Y ed X di 0,127 mm/m, con l'angolo $\alpha > 90^\circ$.



5. SINTESI DEI RISULTATI

Non tutti gli errori ricadono nelle categorie considerate. La immediata presentazione grafica del risultato a fine misura evidenzia comportamenti degli assi della più varia natura, come illustrato nelle figure seguenti. Questo conferma come una fotografia istantanea della situazione, di esecuzione molto rapida mediante il ball bar, può anche segnalare difetti inaspettati od occulti, che esulano dalla precisione geometrica o dalla precisione di posizionamento, e possono essere rivelati solo con analisi dinamiche.

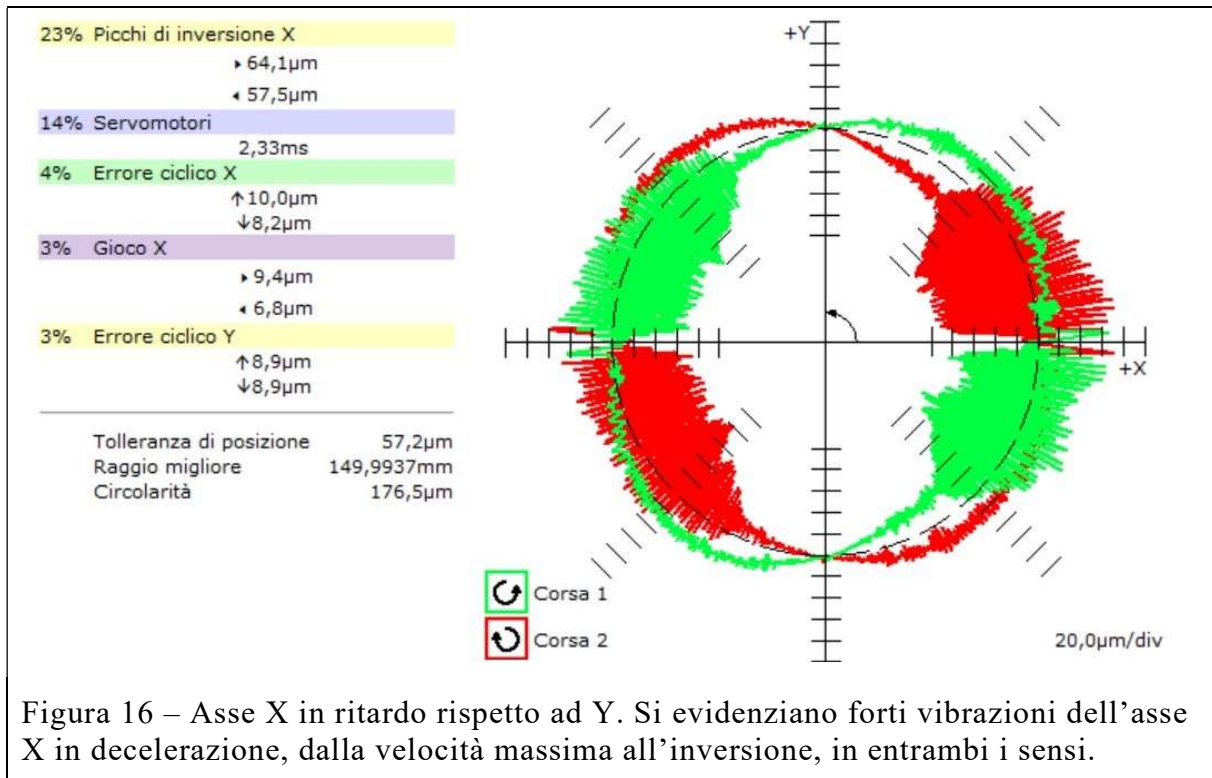


Figura 16 – Asse X in ritardo rispetto ad Y. Si evidenziano forti vibrazioni dell'asse X in decelerazione, dalla velocità massima all'inversione, in entrambi i sensi.

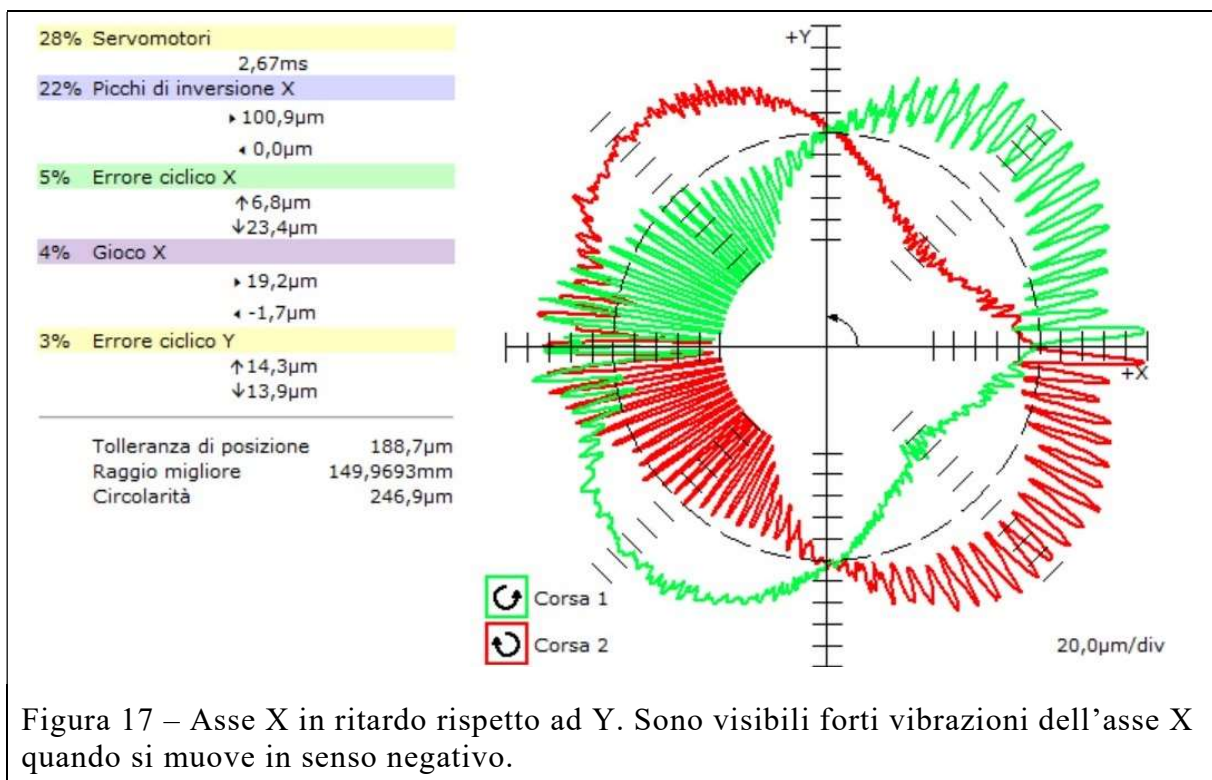
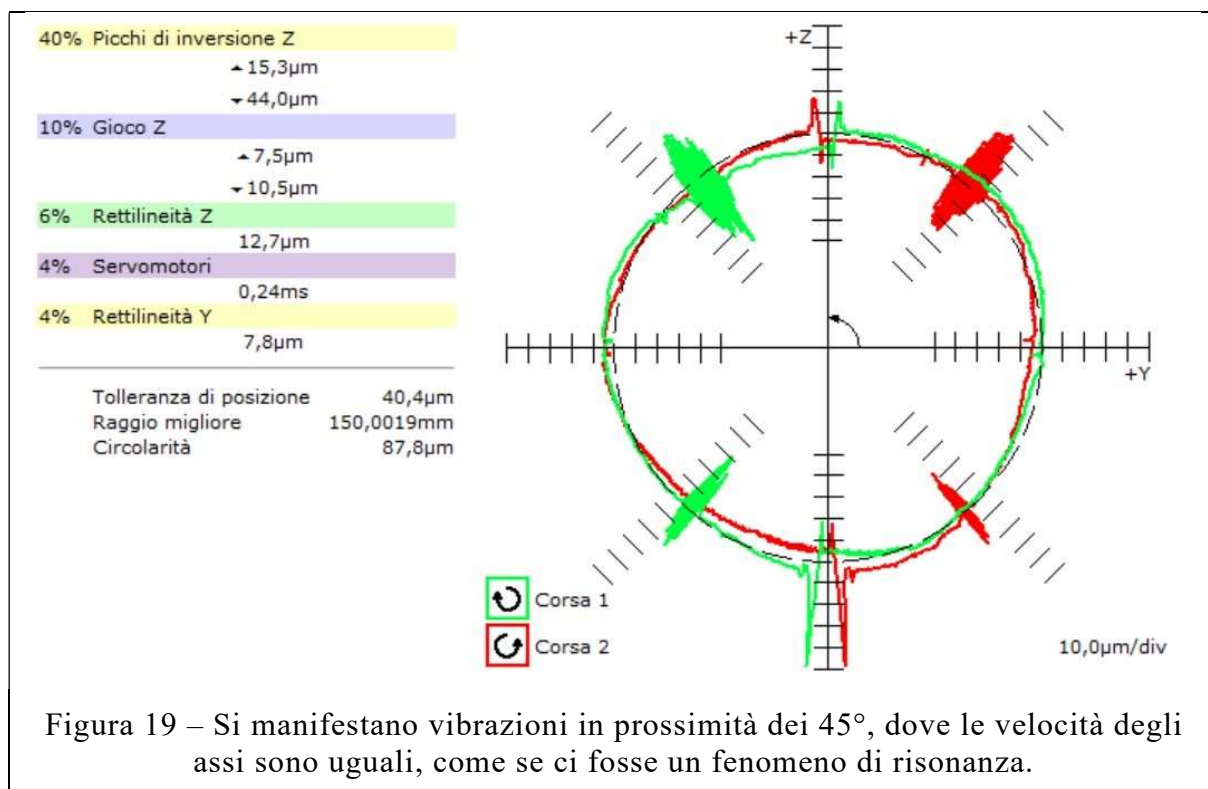
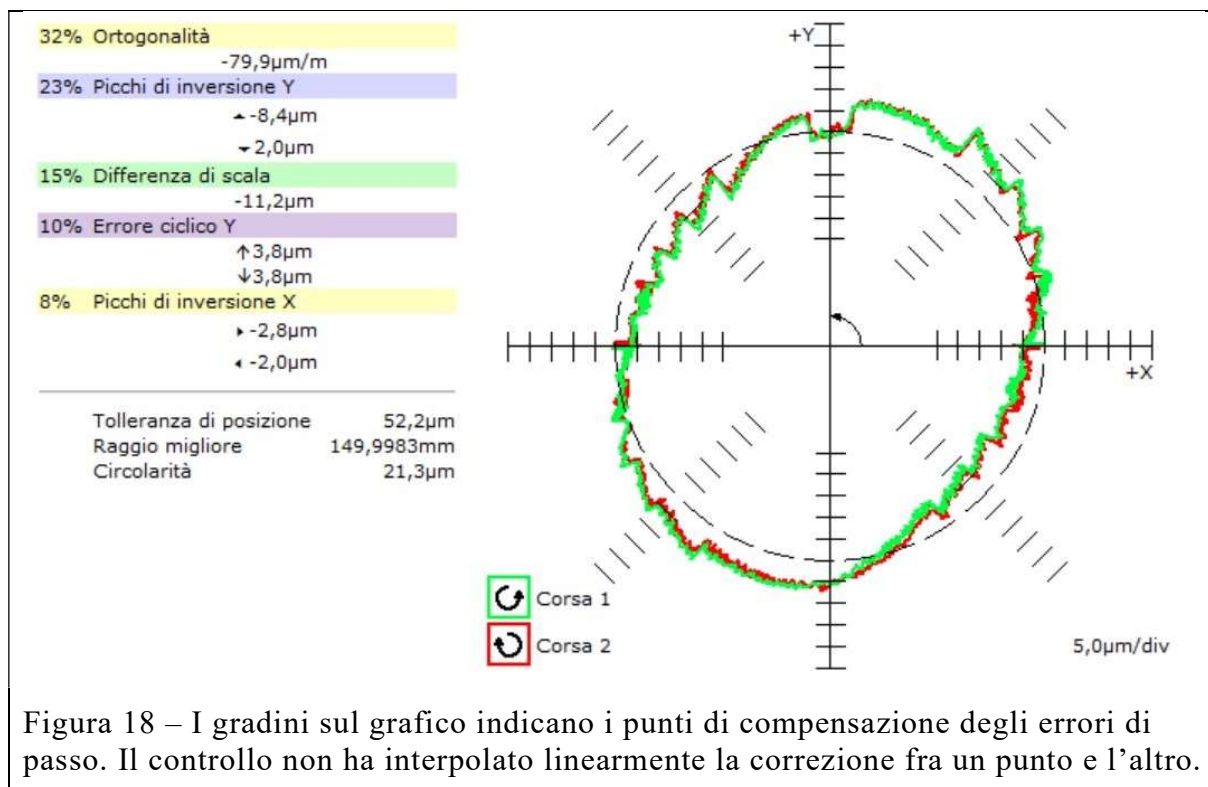
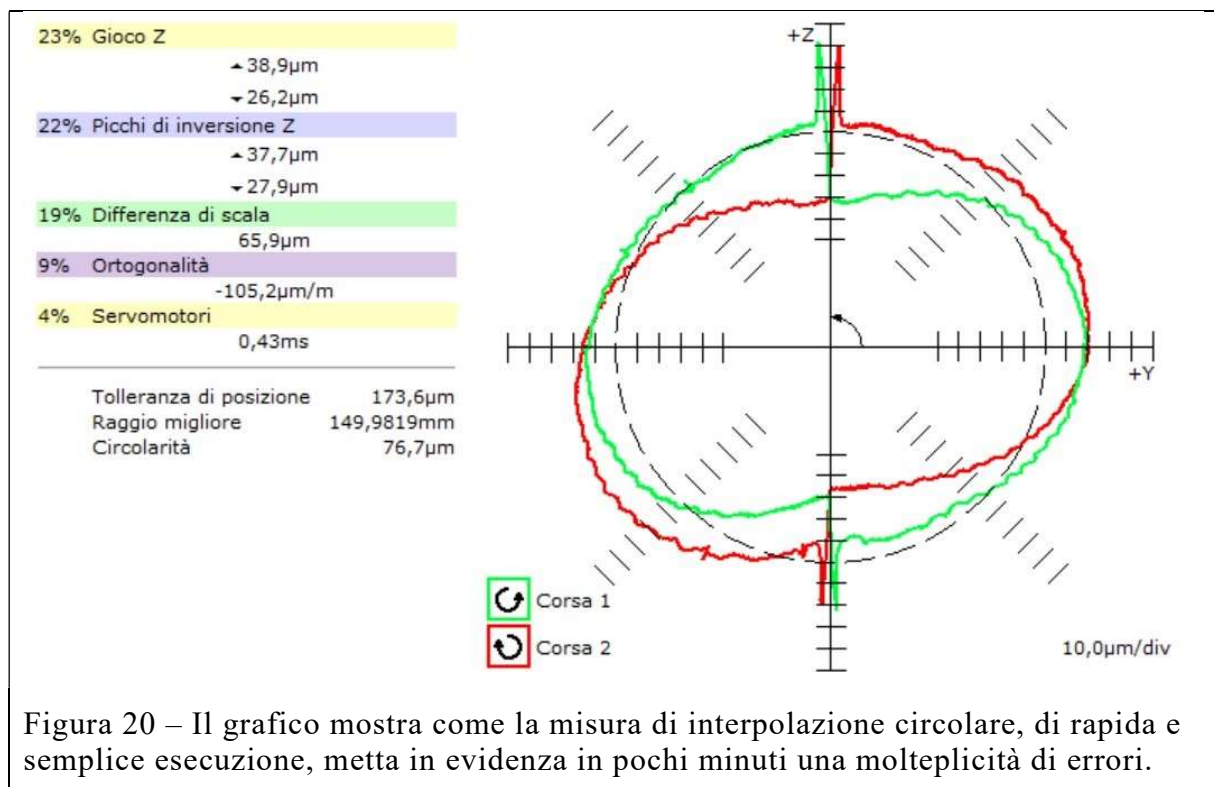


Figura 17 – Asse X in ritardo rispetto ad Y. Sono visibili forti vibrazioni dell'asse X quando si muove in senso negativo.





6. MISURA SUI TRE PIANI COORDINATI

Su macchine per lavorazioni prismatiche, come fresatrici, alesatrici e centri di lavorazione, si è spesso considerato, soprattutto se il mandrino ha un solo orientamento (parallelo all'asse Z) che il piano di interpolazione importante sia solo il piano XY.

La pratica ha dimostrato il contrario, come evidenziato nelle figure seguenti. La prima ragione è che macchine con teste universali possono normalmente eseguire contornature in diversi piani, ma anche senza questo la verifica in tutti e tre i piani coordinati può rivelare comportamenti non previsti.

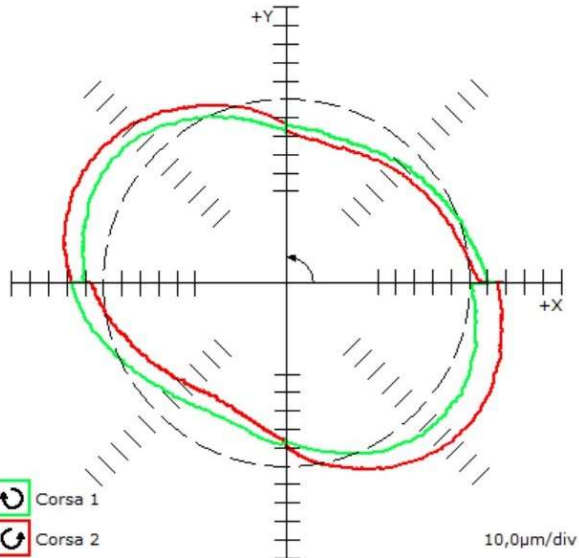
La figura 21 mostra i tre grafici delle misure eseguite successivamente nei tre piani di un centro di lavorazione a 4 assi a mandrino orizzontale.

Analogamente la figura 22 mostra i risultati delle tre misure su un'altra macchina. Una sola misura nel piano XY non potrebbe fornire tale completezza di informazioni.

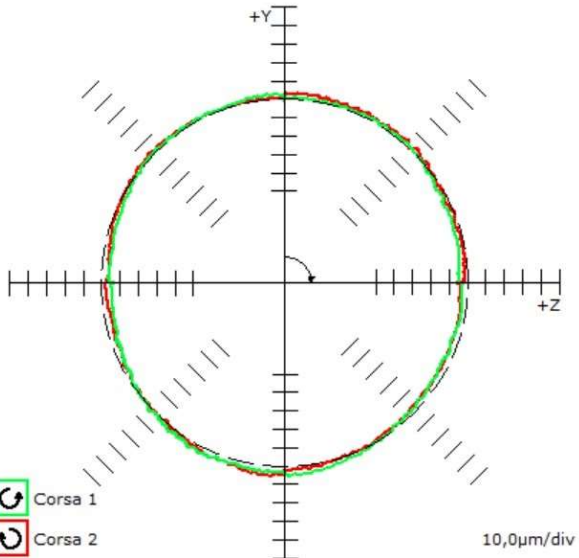
Nello stesso modo su torni e centri di tornitura si è considerato spesso solo il piano ZX, per evidenti ragioni, ma ormai molti sono dotati di assi Y, sebbene talvolta piuttosto corti, e quindi anche sui centri di tornitura è utile misurare nei tre piani.

Inoltre, sebbene la misura sia eseguita in interpolazione circolare, il suo scopo non è limitato a prevedere o analizzare il comportamento della macchina in contornatura, ma fornisce, come illustrato, molte più informazioni, non sempre ottenibili con altri strumenti.

38% Ortogonalità	108,1 μ m/m
27% Differenza di scala	46,0 μ m
12% Gioco X	▶ -10,0 μ m ◀ -10,5 μ m
6% Gioco Y	▶ -4,9 μ m ◀ -4,0 μ m
5% Rettilinearità Y	9,2 μ m
Tolleranza di posizione 221,4 μ m	
Raggio migliore 300,0290mm	
Circolarità 53,7 μ m	



23% Differenza di scala	11,7 μ m
14% Servomotori	-0,21ms
12% Gioco Y	▶ -2,4 μ m ◀ -3,0 μ m
8% Gioco Z	▶ -2,1 μ m ◀ -1,4 μ m
8% Scampanamento Z	▶ -0,4 μ m ◀ -3,1 μ m
Tolleranza di posizione 97,7 μ m	
Raggio migliore 300,0169mm	
Circolarità 12,3 μ m	



37% Differenza di scala	-60,9 μ m
24% Ortogonalità	65,1 μ m/m
13% Gioco X	▶ -10,3 μ m ◀ -9,2 μ m
8% Rettilinearità Z	12,5 μ m
7% Scampanamento Z	▶ 5,7 μ m ◀ 5,6 μ m
Tolleranza di posizione 203,2 μ m	
Raggio migliore 300,0288mm	
Circolarità 52,2 μ m	

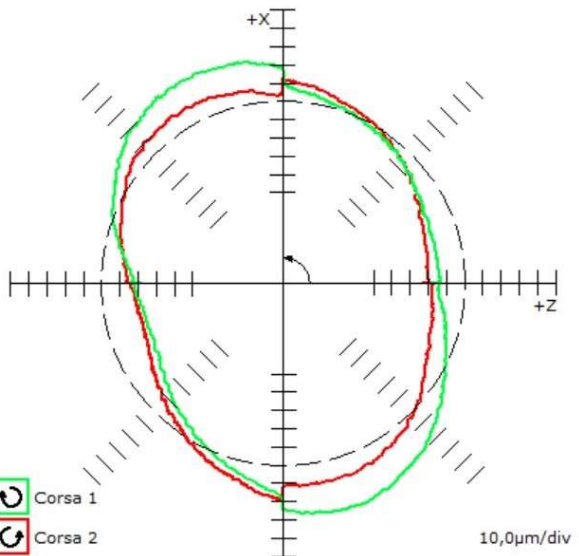
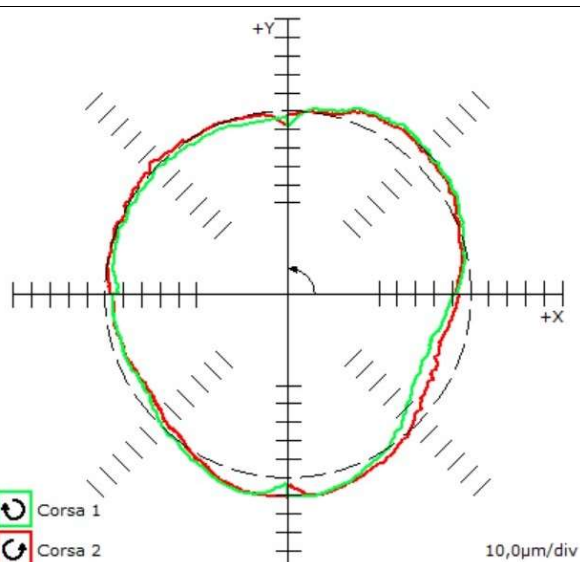
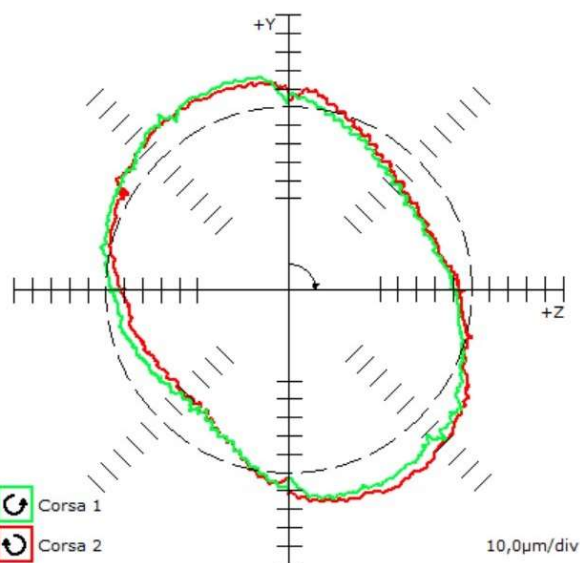


Figura 21 – Interpolazione nei tre piani della stessa macchina

20% Rettilinearità X	24,7µm
19% Differenza di scala	-23,0µm
12% Picchi di inversione Y	↖ -7,2µm ↘ -7,1µm
10% Ortogonalità	-21,0µm/m
8% Rettilinearità Y	9,5µm
<hr/>	
Tolleranza di posizione	68,9µm
Raggio migliore	299,9992mm
Circolarità	29,7µm



41% Ortogonalità	107,2µm/m
19% Differenza di scala	30,3µm
9% Picchi di inversione Y	↖ -7,3µm ↘ -4,3µm
6% Rettilinearità Y	9,3µm
5% Scampanamento Z	↗ 1,7µm ↙ 5,4µm
<hr/>	
Tolleranza di posizione	145,0µm
Raggio migliore	299,9920mm
Circolarità	45,4µm



20% Differenza di scala	-53,0µm
16% Ortogonalità	71,6µm/m
16% Scampanamento Z	↗ -6,7µm ↙ -29,9µm
13% Servomotori	1,06ms
13% Scampanamento X	↖ -16,9µm ↘ 31,0µm
<hr/>	
Tolleranza di posizione	179,4µm
Raggio migliore	299,9813mm
Circolarità	63,6µm

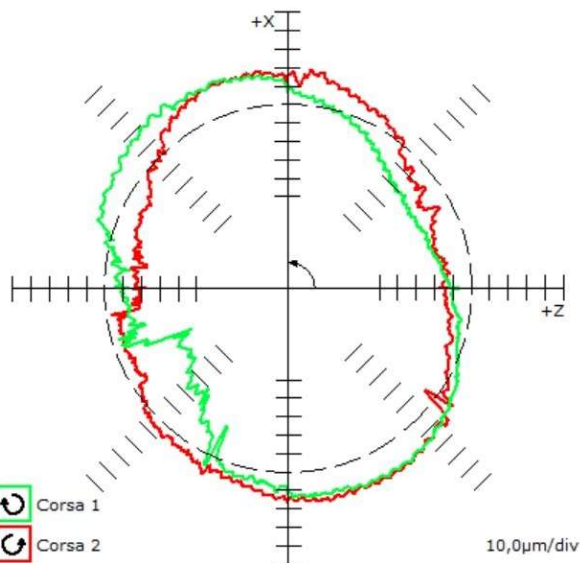


Figura 22 – Interpolazione nei tre piani della stessa macchina



Figura 23 - Alesatrice – Misura nel piano YZ



Figura 24 - Centro di tornitura con asse Y – Misura nel piano YZ