

MISURA DEGLI ERRORI GEOMETRICI E DI POSIZIONAMENTO
NELL'INTERO VOLUME DI LAVORO
DI UN ROBOT CARTESIANO A PORTALE DI GRANDI DIMENSIONI

Gianmarco Liotto

Optodyne Laser Metrology srl
Via Veneto,5 20881-Bernareggio (MB)
tel. 039 6093618 optodyne@optodyne.it

Sunto

Per ottenere una migliore precisione di posizionamento di una macchina utensile o di un robot è importante la misura dell'errore volumetrico, che ingloba gli errori di posizionamento lineare, gli errori geometrici di rettilineità e di perpendicolarità di tutti e tre gli assi e gli errori di deformazione o cedimento ed espansione termica.

I. Introduzione

Le prestazioni, o in altri termini la precisione di una macchina utensile o di un Robot controllati da CNC, sono commisurate agli errori lineari di posizionamento, agli errori di rettilineità, agli errori angolari ed agli errori di elasticità. Una misurazione completa di questi errori è molto lunga e complessa. La misurazione diagonale del corpo macchina è raccomandata dagli standard internazionali quali ISO 230-6 ed ASME B5.54 per una rapida verifica della precisione volumetrica. Questo perché la misura diagonale è sensibile a tutte le componenti di errore.

I test di precisione di posizionamento lungo le diagonali, secondo la normativa ASME B5.54 sono stati usati con successo per molti anni dalla *Boeing Aircraft* e da molti altri per determinare la precisione di posizionamento volumetrico.

Occorre sottolineare che con la misura diagonale non si hanno sufficienti informazioni per identificare le sorgenti di errore ed effettuare la loro compensazione, è necessaria la misura delle singole componenti di errore per poterne effettuare la compensazione .

La caratterizzazione del movimento di una macchina è molto complessa. Per ogni asse di movimento, ci sono 6 gradi di libertà e quindi 6 errori: lineare in X , di rettilineità nelle direzioni Y e Z, angoli di rollio, beccheggio ed imbardata. Per una macchina a 3 assi ci sono 18 errori più 3 di quadratura totale 21 errori, questo assumendo la macchina come un corpo rigido. La precisione di una macchina può essere migliorata con la misurazione di tutti questi errori e con la loro compensazione, a condizione che la macchina sia ripetibile. La ripetibilità è il limite della compensazione.

Gli errori angolari si evidenziano come errori lineari di rettilineità e posizionamento, per cui possiamo semplificare l'analisi riducendo a 12 gli errori, nominalmente 1 posizione lineare 2 rettilineità per ogni asse e 3 errori di squadra o perpendicolarità di movimento.

Il valore dell'errore di posizionamento volumetrico è quindi la somma di almeno 12 errori (considerando la macchina come un corpo rigido). Gli errori angolari hanno come conseguenza un cambiamento degli errori di posizionamento lineare e di rettilineità quando misurati in posizioni e traiettorie diverse e con la misura volumetrica diagonale si esplora tutta l'escursione di ogni asse.

I 12 errori si sommano, ma avendo segno e distribuzioni diverse è consuetudine considerare lo scarto quadratico medio (radice della somma dei quadrati) un valore che rappresenta nella maggior parte dei casi la realtà.

ad esempio considerando $\sqrt{1}$ il contributo di ogni errore lineare abbiamo

$$\text{errore volumetrico} = \sqrt{1 \times 12} = 3,45$$

Come semplice conseguenza possiamo considerare che dove venga accettato un errore lineare di valore convenzionale 1 deve essere considerato come equivalente un valore 3,45 volte superiore.

Un'altra considerazione importante è che gli errori di una macchina dovrebbero essere considerati come errori per metro per avere significato e poter essere confrontati con altre sezioni di macchina o con altre macchine o con i pezzi da lavorare.

Il solo movimento di espansione a contrazione dei materiali può giustificare questa affermazione. L'acciaio ha un coefficiente di 0,012mm per metro e per grado, considerando una macchina di 10m e solo 4 gradi di variazione di temperatura ottengo una variazione di 0,5mm. Se si considera l'alluminio e le sue leghe il valore si raddoppia 1mm per 4 gradi e 10m.

II. CONCETTI BASE DELLA MISURA DIAGONALE

1. Misura diagonale

Il metodo di misura diagonale è raccomandato per un rapido esame delle prestazioni di posizionamento e di geometria della macchina in tutte le sue componenti. Si tratta di misurare lungo le 4 diagonali la precisione di posizionamento mediante un interferometro laser. Un riflettore viene applicato solidale all'end-effector ed illuminato dal raggio laser che è stato allineato lungo la diagonale della macchina, per esempio dallo spigolo in basso a destra (X=0 Y=0 Z=0 denominato NNN) allo spigolo in alto a sinistra (Xmax. Ymax. Zmax. denominato PPP) del volume di lavoro della macchina. Viene misurata la posizione a zero e ad ogni incremento dei tre assi, che vengono mossi contemporaneamente per raggiungere la nuova posizione lungo la diagonale. La precisione della posizione di ogni posizione lungo la diagonale dipende dalla precisione di posizionamento dei tre assi, ma anche e soprattutto dalla geometria. Per cui è un buon metodo per verificare la precisione di una macchina, anche se non fornisce sufficienti informazioni per determinare la sorgente degli errori.

III. MISURE DI VERIFICA

1. Strumentazione utilizzata

In una misura diagonale convenzionale lo spostamento è una linea retta lungo la diagonale del corpo macchina. Nella misura diagonale convenzionale la traiettoria del bersaglio riflettore è una linea retta per cui è possibile usare un bersaglio catadiottrico che può tollerare uno spostamento laterale di 5mm. Si è utilizzato un laser a singolo raggio e singola apertura basato sull'effetto Doppler che può essere usato con uno specchio piano come bersaglio. Il sistema di calibrazione Laser Doppler Displacement Meter (LDDM) OPTODYNE modello MCV500 è un laser interferometro di nuova generazione basato sull'effetto Doppler e a singolo raggio, per cui la luce riflessa dallo specchio bersaglio rientra nella stessa apertura dalla quale viene emessa. Il sistema è completato da uno specchio di rinvio per indirizzare il raggio in diagonale e da uno specchio come bersaglio. Per l'acquisizione automatica dei dati, il calcolo degli errori e la generazione delle tabelle di compensazione è stato usato il software Optodyne LDDM Versione 2.63

2. Effettuazione della misura

La macchina è stata misurata lungo le 4 diagonali ottenute per mezzo di passi di avanzamento interpolati sui tre assi, come descritto precedentemente. Il Laser è stato montato su di un supporto per posizionarlo nella parte bassa delle varie diagonali, e per mezzo dello specchio di allineamento, il raggio è stato diretto lungo la diagonale. Lo specchio catadiottrico è stato montato sull'end-effector, come illustrato nella figura 1. La macchina è stata programmata per muovere l'end-effector, partendo da uno spigolo per arrivare allo spigolo opposto. Sono state usate tutte le compensazioni di passo già inserite nel controllo numerico. Il raggio laser è stato allineato parallelo alla direzione di movimento diagonale. La tolleranza tipica di allineamento è minore di 0,1 mRadianti o 0,1mm sulla distanza di 1metro.

3. Collezione ed analisi dei dati di precisione volumetrica

1. L'errore di posizionamento è stato misurato per mezzo di un laser Doppler (LDDM) a singola apertura. Sono state misurate la temperatura e la pressione dell'aria per compensare la variazione della velocità della luce, e la temperatura del materiale per la compensazione della espansione termica del materiale.
2. I dati sono stati acquisiti automaticamente dal software LDDM ad ogni fermata della macchina. I dati di errore sono stati analizzati per mezzo del software LDDM. Cliccando su *4-diagonal* nella sezione di analisi e richiamando i 4 file di dati errore sulle diagonali. Sono stati generati i grafici riassuntivi dell'errore volumetrico della macchina che sono riportati in seguito.

4. Errori di misura

La precisione del sistema di misura laser è elevata, migliore di 1ppm, le sorgenti di errore tipiche sono: errori di allineamento o errore di coseno, errori dovuti alla misura della temperatura e della pressione.

Nella misura diagonale bisogna tenere in considerazione gli errori tipici della misura interferometrica:

5. Budget di errore

Le variabili in gioco sono le seguenti:

Controllo temperatura 0,1°C

Controllo pressione	0,5 mBar
Corsa totale	4 m
Percorso morto	500 mm
Coefficiente di espansione	12 μ / m / C°
Abbe offset	50mm
Errore di lunghezza d'onda laser	1 μ m /m

Ne risultano quindi i seguenti errori:

Compensazione temp Aria	1ppm x 10m x 0,1 °C = 1 μ m
Compensazione pressione Aria	0,3 ppm X10m X0,5mBar = 1,5 μ m
Espansione materiale	12 μ / m / C° x 10m x 0,1 °C = 12 μ m
Percorso morto	1ppm x500 mm x 0,1°c = 50 μ m
Errore di Abbe	0,05m x 20 μ Radianti = 2 μ m
Errore di coseno	0,5 ² mRad. /2 x 4m = 0,5 μ m
Errore lunghezza d'onda	1ppm x 10m = 10 μ m

L'errore totale o l'incertezza di misura il seguente:

$$E = \sqrt{1^2 + 1,5^2 + 12^2 + 50^2 + 2^2 + 0,5^2 + 10^2} = 52,4 \mu\text{m} \quad \text{o } 5,2 \mu\text{m/m}$$

6. Misura e compensazione dei singoli errori

Sfortunatamente le misure di posizionamento diagonale non forniscono sufficienti informazioni per risalire alla sorgente di errore. Se gli errori eccedono i limiti, è necessario provvedere alla misura delle singole componenti di errore, errore di posizionamento lineare, errori di angolo, errori di retti lineità, misure di perpendicolarità, per poter procedere alla generazione delle tabelle di compensazione. Le misure degli errori lineari sono state effettuate con un laser a due raggi paralleli che permette di rilevare due misure di lunghezza (variazione di distanza) ad una distanza nota, misurando contemporaneamente posizione, angolo e calcolando la rettilineità. con un sensore di rettilineità, "Quad Detector" è stata misurata la rettilineità orizzontale e verticale.

Strumenti adoperati:

Optodyne -MCV 500 sistema di misura lineare compatto, singolo raggio e singola apertura (raggio coassiale)

Optodyne -MCV 4000 Dual Beam Laser Calibration System che include Quad detector e pentaprisma per la Misura di Rettilineità e squadra.

7[5] . Riferimenti e bibliografia

I] **Schultschik R.**, "The components of the volumetric accuracy", Annals of the CIRP Vol. 25, No. 1, 1977, pp223-228.

- [2] **Wang, C and Liotto, G.**, A theoretical analysis of 4 body diagonal displacement measurement and sequential step diagonal measurement, Proceedings of the LAMDAMAP 2003 Conference, Huddersfield, England, July 2-4, 2003.
- [3] "Methods for Performance Evaluation of Computer Numerically Controlled Machining Centers" An American National Standard, **ASME B5.54-1992** by the American Society of Mechanical Engineers, p69, 1992.
- [4] **ISO 230-6:** 2002 Test code for machine tools -Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals(Diagonal displacement tests)", *an International Standard*, by International Standards Organization,2002.
- [4] **Svoboda, O**, (Prague University,research center)Volumetric positioning accuracy of a vertical machining center equipped with linear motor drives (evaluated by the laser vector method), Proceedings of the LAMDAMAP 2003 Conference, England, July 2-4,2003.
- [5] **Chung, C., Yeh, S., Liang, J., and Wang, C.**, "Design of Volumetric Error Software Compensation Algorithm", Proceedings of the JUSFA 2002 Conference in Hiroshima, Japan, July 15-17, 2002.
- [6] **G. Liotto and C.P.Wang** “ Laser Doppler Displacement Meter (LDDM) allow new diagonal measurement for large aspect ratio machine tool easily and accurately”, Proceedings of LAMDAMAP International Conference of Laser Metrology and Machine Performance, Huddersfield, West Yorkshire England, 15-17 Luglio, 1997
- [7] **Liotto, G** "Metodo Vettoriale per la misura degli errori di posizionamento e di rettilineità nell'intero volume di lavoro di una macchina utensile o CMM " Atti del II Congresso "Metrologia & Qualità " Vol 2, 20-21-22 Febbraio 2001. Torino. Italia
- [8] **Liotto G.** " Solo un giorno, per la misura e la compensazione volumetrica di una macchina utensile a 5 assi di grandi dimensioni, per mezzo del Metodo Vettoriale e del laser Doppler". Atti III congresso " Metrologia & Qualità", 26-27 Febr. 2003 Torino- Lingotto. Italia