

Misura e Controllo dell'errore di Posizionamento Volumetrico in 3D in Presenza di Deformazione Termica.

Ondrej Svoboda

Research Center of Manufacturing Technology

Czech Technical University in Prague, Czech Republic

e

Charles Wang*

Optodyne, Inc.,

Compton, CA 90220, USA

Email: optodyne@aol.com

Abstract

Per costruire parti accurate o di buona qualità, è molto importante misurare e compensare gli errori tridimensionali (3D) di posizionamento volumetrico di un centro di lavoro. Inoltre in un ambiente di lavoro reale e sotto vari carichi sull'utensile, la deformazione termica della macchina può causare ulteriori errori di posizionamento.

Recentemente, Optodyne ha sviluppato per i centri di lavoro la tecnica laser vettoriale per la misura degli errori di posizionamento volumetrico, che comprendono l'errore di posizionamento lineare, errori di rettilineità ed errori di squadra, in tempi ridottissimi. Con l'utilizzo di questa tecnica combinata con i dati ottenuti da un set di termocoppie piazzate in punti strategici della struttura della macchina utensile, può essere determinata la correlazione tra la distribuzione della temperatura e gli errori di posizionamento 3D. Usando i gli errori di posizionamento misurati, possono essere generate più mappe di compensazione. Le mappe relative ad un determinato stato termico possono essere interpolate per ottenere un'elevata precisione a carichi termici variabili.

Sono riportati di seguito gli errori di posizionamento volumetrico 3D; la tecnica laser vettoriale; la misurazione degli errori di posizionamento volumetrico 3D con differenti carichi termici e temperature ambiente, e alcuni risultati preliminari.

1. Introduzione

Per la costruzione di parti di alta qualità, i costruttori di macchine utensili si sforzano per aumentare la precisione e la produttività ad applicare vari metodi che coprono l'ottimizzazione del corpo macchina, ottimizzazione del montaggio, introduzione di sistemi di raffreddamento e così via. Inoltre, nel reale ambiente di officina e sotto vari carichi di lavoro, la espansione termica della macchina può causare un elevato errore di posizionamento volumetrico 3D. Quindi diventa importante, per migliorare la precisione di posizionamento sotto vari carichi termici, la misura ed il controllo dell'errore di posizionamento volumetrico 3D. Questi errori possono essere propriamente compensati, a condizione che gli errori di posizionamento e la distribuzione della temperatura della macchina siano misurati e determinata la loro correlazione.

Venti anni fa, il maggiore errore di posizionamento era semplicemente l'errore di passo causato dalla vite e la sua espansione termica. Ora, gran parte dell'errore di passo della vite è stato ridotto per mezzo di migliori viti a ricircolo di sfere, a volte con raffreddamento interno o per mezzo di righe ottiche e compensazione del passo vite. Per cui i maggiori errori sono diventati gli errori di squadra e gli errori di rettilineità.

Inoltre, il cambiamento della temperatura della macchina con l'ambiente, il riscaldamento della vite a ricircolo, lavorazioni ad alta velocità, forza di taglio e refrigerante, eccetera, possono causare errori di squadra e rettilineità aggiuntivi. Utilizzare un laser interferometro tradizionale, per misurare rettilineità e perpendicolarità, è molto difficile e implica l'uso di ottiche complesse e allineamento difficile. L'apparecchiatura è costosa e le misure prendono molto tempo. Inoltre la

durata della misura è troppo lunga, l'errore di posizione può cambiare a causa della variazione di temperatura.

Recentemente, Optodyne ha sviluppato la tecnica laser vettoriale per misurare in breve tempo degli errori di posizionamento volumetrico 3D, che comprendono 3 errori di posizionamento lineare, 6 errori di rettilineità e 3 errori di perpendicolarità[1]. Questa tecnica è stata usata per una rapida misura degli errori di posizionamento volumetrico 3D di un centro di lavoro CNC sottoposto a vari carichi sul mandrino, movimenti degli assi e condizioni ambientali. E' stato effettuato Il calcolo della correlazione per determinare le temperature chiave e i vari errori di posizionamento. Basandosi sugli errori di posizionamento 3D e sulle temperature chiave a vari carichi termici possono essere generate molte tabelle o mappe di compensazione. Per uno specifico carico termico, può essere generata una nuova mappa usando l' interpolazione lineare. Per cui caricando queste mappe di errore nel controllo numerico CNC, gli errori di posizionamento 3D possono essere compensati sotto vari carichi termici.

2. Errori di posizionamento 3D

In una macchina a 3 assi ci sono 6 errori per asse per un totale di 18 errori più 3 errori di perpendicolarità [2,3]. Questi 21 errori di un corpo rigido possono essere espressi come segue.

Errori di posizionamento lineare: $Dx(x)$, $Dy(y)$, and $Dz(z)$

Errori di rettilineità verticale: $Dy(x)$, $Dx(y)$, and $Dx(z)$

Errori di rettilineità orizzontale: $Dz(x)$, $Dz(y)$, and $Dy(z)$

Errori angolari di rollio: $Ax(x)$, $Ay(y)$, and $Az(z)$

Errori angolari di beccheggio: $Ay(x)$, $Ax(y)$, and $Ax(z)$

Errori angolari di imbardata: $Az(x)$, $Az(y)$, and $Ay(z)$

Errori di squadra: \emptyset_{xy} , \emptyset_{yz} , \emptyset_{zx} ,

Dove D è l'errore lineare, l'indice è formato dalla direzione dell'errore e la coordinata di posizionamento, tra parentesi. A è l'errore angolare, l'indice è formato dall'asse di rotazione e dalla coordinata di posizionamento, tra parentesi.

La somma di tutti gli errori in ogni direzione asse può essere espressa da:

$$Dx(x,y,z) = Dx(x) + Dx(y) + Dx(z)$$

$$Dy(x,y,z) = Dy(x) + Dy(y) + Dy(z) + \emptyset_{xy} * x / X$$

$$Dz(x,y,z) = Dz(x) + Dz(y) + Dz(z) + \emptyset_{yz} * y / Y + \emptyset_{zx} * x / X$$

Tutti questi errori possono cambiare per una diversa distribuzione di temperatura o carico termico.

3. Misura degli errori di posizionamento volumetrico 3D per mezzo della tecnica vettoriale.

La maggioranza delle tecniche e dei dispositivi di misura sono basati sulla filosofia che "da una misura si ottiene una sola informazione riguardante un singolo errore geometrico". Questo si traduce in un estensiva richiesta di tempo e di apparecchiature per cercare gli errori di posizionamento volumetrico 3D. La misura laser vettoriale rappresenta un concetto di misura diverso. É una misura composta, cioè con 4 allineamenti e misure sono determinate 12 componenti di errore. E' una tecnica molto efficiente ed efficace.

Nella tecnica di misura vettoriale [1], simile alla misura di posizionamento diagonale del corpo macchina descritto da ASME B5.54 e ISO230-6 [4, 5, 6], il raggio laser è puntato lungo la diagonale del volume di lavoro come illustrato in Fig. 1. Tuttavia, invece che muovere gli assi x,y e z insieme lungo la direzione della diagonale, fermarsi e collezionare la misura, ora muove solo x, si ferma e raccoglie la misura, poi muove y, si ferma e raccoglie la misura, poi muove z, si ferma e raccoglie la misura e così via fino a che non viene raggiunto lo spigolo opposto. Per cui sono raccolti il triplo dei dati. Per 4 diagonali del corpo macchina, vengono raccolti un totale di 12 set di dati e determinati gli errori di posizionamento volumetrico. Il tempo di misura è breve, l'apparecchiatura è compatta, e la messa in servizio e l'allineamento sono semplici.

4. Misura della distribuzione della temperatura con vari carichi termici

La causa della deviazione termica può essere divisa in due categorie di base. La prima parte è dal carico termico risultante dalla operatività della macchina utensile. Le più significative sorgenti di calore in una macchina utensile CNC sono il mandrino, la vite a ricircolo o in alternativa il motore lineare ed il calore derivante dal processo di lavorazione. La seconda parte è rappresentata dalla deviazione raggiunta a causa della deformazione della struttura della macchina causata da influenze esterne - principalmente la temperatura ambiente dell'officina, variazioni di temperatura, temperatura del liquido refrigerante, correnti d'aria, esposizione al sole, ecc. Per misurare la distribuzione della temperatura, sono stati piazzati sensori di temperatura in posizioni chiave. Le temperature sono state misurate in continuazione durante i cicli di misura, il riscaldamento del mandrino e i movimenti rapidi degli assi x-y-z.

5. Organizzazione delle prove e risultati delle misure

Le misure sono state effettuate su di un centro di lavoro verticale MCFV5050LN, a PRAGA, Repubblica Ceca. La macchina è equipaggiata di motori lineari, è strutturata con una tavola a croce con due assi motorizzati ed un mandrino(asse-Z) orientato verticalmente. Le corse di ogni asse sono le seguenti: asse-X 500mm, asse-Y 400mm, asse-Z 400mm.

Il sistema di misura laser usato è Laser Doppler Displacement Meter (LDDM), OPTODYNE modello MCV-500 con l'accessorio SD-500 misura diagonale a passi sequenziali. Sono stati montati due laser sulla tavola della macchina e sono stati utilizzati specchi con regolazioni micrometriche per l'allineamento dei raggi lungo le diagonali. Due specchi piani 75×100mm sono stati montati sul mandrino con le facce orientate perpendicolarmente ai raggi laser. Le macchine sono state programmate per muovere il mandrino relativamente alla tavola di lavoro partendo da uno spigolo fino a quello opposto. La temperatura e la pressione dell'aria sono state misurate e compensata la variazione di velocità della luce ed è stata misurata la temperatura della macchina e

compensata l'espansione termica della macchina. I dettagli delle misure e dei risultati sono contenuti nella tesi di dottorato (Ph.D) di O. Svoboda [7].

Sono qui riportati i dati raccolti dopo i movimenti ad alta velocità del mandrino e degli assi. Il ciclo di lavoro consiste in una rotazione continua alla massima velocità di 15000 g/m e nel movimento degli assi per la corsa massima in xyz in direzione diagonale a 50% della velocità massima di movimento rapido. In Fig.2 sono visualizzati i dati di temperatura per 6 cicli di misura per i sensori localizzati sul mandrino, sulla colonna z, nel centro dell'asse x e sul frontale dell'asse y. Risulta chiaramente che il massimo riscaldamento appare in prossimità del mandrino. La temperatura aumenta continuamente per effetto del riscaldamento del mandrino e del continuo movimento rapido degli assi xyz. Questi cambiamenti di temperatura sono causa di differenti deformazioni termiche della colonna z e della tavola xy con il risultato di una variazione nelle misure di posizionamento volumetrico 3D.

La massima deviazione misurata dell'errore di posizionamento lineare dei 3 assi è illustrata in Fig. 3. Sia l'asse y che l'asse z mostrano un incremento dell'errore di passo. L'aumento dell'errore di posizionamento lineare o errore di passo, è stato proporzionale all'aumento della temperatura della tavola come previsto. Invece per l'asse z, l'aumento dell'errore di posizionamento lineare si è rivelato molto superiore all'aumento dovuto alla temperatura del errore di passo. L'aumento eccessivo dell'errore di posizionamento lineare è dovuto all'aumento dell'errore di perpendicolarità XZ.

Gli errori di rettilineità sono stati misurati per tutti gli assi x,y e z. La massima variazione dell'errore di rettilineità è illustrata in Fig. 4. La deviazione termica per la rettilineità dell'asse z (ZDX and ZDY) e per la rettilineità verticale dell'asse y (YDZ), sono relativamente ampie e per la rettilineità dell'asse x (XDY and XDZ) e per la rettilineità orizzontale dell'asse y (YDX) i cambiamenti dovuti alla temperatura sono invece relativamente piccoli.

Gli errori di perpendicolarità rappresentano una delle parti principali del budget di errore. Come illustrato in Fig. 5, la massima variazione dell'errore di squadra nei piani XY e ZX è stata positiva e per il piano YZ è stata negativa. La massima deviazione è stata di 40 micron/m e -75 micron/m.

6. Sunto e conclusioni

La tecnica laser di misura vettoriale è stata usata con successo per lo studio dell'errore di posizionamento volumetrico 3D con varie condizioni di temperatura. È stata determinata la correlazione tra il carico termico e la precisione volumetrica 3D. I dati preliminari mostrano che alcuni errori di rettilineità sono molto sensibili alle variazioni di temperatura della macchina e che il più grande errore causato dal carico termico è la caduta dell'asse Z. Basandoci sui risultati delle misure, si conclude che la strategia di compensazione degli errori volumetrici 3D, usando il metodo di misura vettoriale per misurare gli errori di posizionamento volumetrico alle varie temperature della macchina e condizioni di lavoro per generare diverse tabelle di compensazione a differenti temperature, dovrebbe funzionare molto bene.

Riconoscimenti: O. Svoboda desidera ringraziare il Ministero dell'Educazione della Repubblica Ceca per il supporto finanziario sul progetto 1M6840770003.

Parole chiave: Errore di posizionamento, Deflessione termica, Compensazione degli errori, e Temperatura macchina.

Riferimenti:

1. C. Wang, "Laser Vector measurement Technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory, Review of Scientific Instruments, Vol. 71, No 10, 3933-3937 (2000).
2. O. Svoboda, P. Bach, G. Liotto, and C. Wang, "Volumetric Positioning Accuracy: Measurement, Compensation and Verification", Proceedings of the JUSFA 2004 Conference, Denver, CO, July 19-21, 2004.

3. C. Wang, O. Svoboda, P. Bach, and G. Liotto "Definitions and correlations of 3D volumetric positioning errors of CNC machining centers," Proceedings of the IMTS 2004 Manufacturing Conference, Chicago, IL, September 8-10, 2004.
4. 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.
5. 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.
6. G. Ren, J. Yang, G. Liotto, and C. Wang "Theoretical Derivations of 4 body Diagonal Displacement Errors in 4 Machine Configurations", Proceedings of the LAMDAMAP Conference, Cransfield, UK, June 27-30, 2005.
7. O. Svoboda, PhD. Thesis, CTU in Prague, 2007.

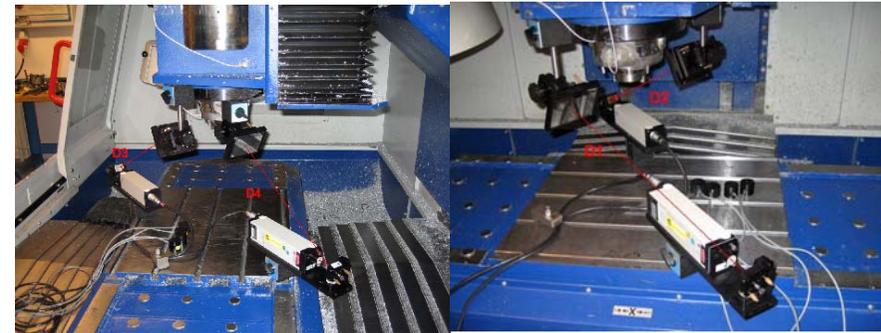


Fig. 1, A foto del centro di lavoro e del posizionamento del sistema di misura vettoriale. D1, D2, D3 e D4 sono le 4 direzioni diagonali del volume di lavoro.

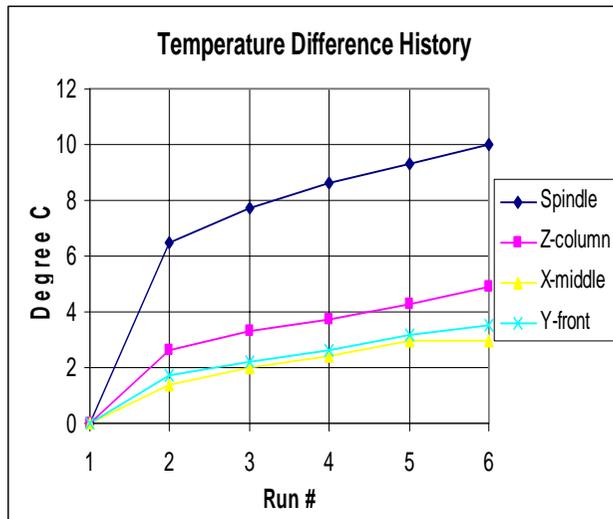


Fig. 2, A grafico dell'andamento della temperatura del mandrino, Z-colonna, X-centro and Y-fronte per misure da 1 a 6.

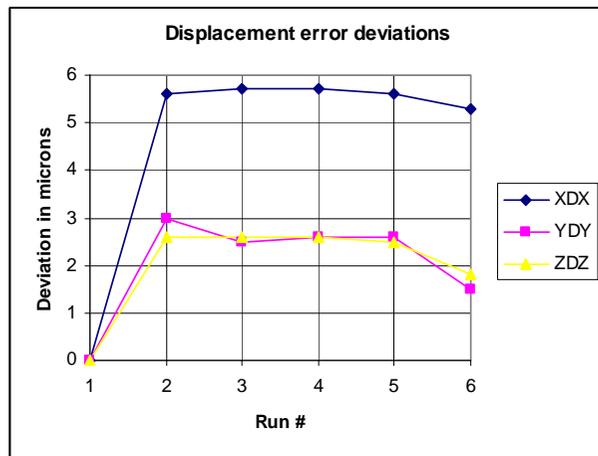


Fig. 3, Massima deviazione dell'errore di posizionamento lineare dei 3 assi, XDX, YDY e ZDZ a 6 differenti condizioni termiche per misure da 1 a 6.

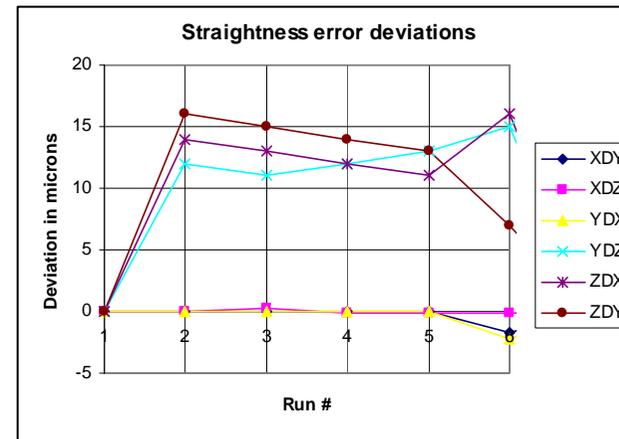


Fig. 4, Massima deviazione di errore di rettilineità dei 3 assi , XDY, XDZ, YDX, TDZ, ZDX e ZDY a 6 differenti condizioni termiche misure da 1 a 6.

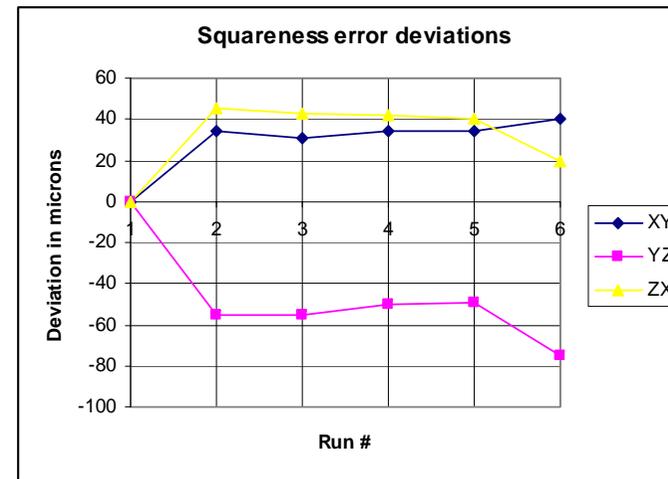


Fig. 5, Massima deviazione di errore di squadra nei piani XY, YZ e XZ a 6 differenti condizioni termiche misure da 1 a 6.