

La Correzione Elettronica Dimensionale e Geometrica dei Robot Cartesiani e delle Macchine Utensili diventa uno strumento di ingegneria costruttiva e la Misura Volumetrica Diagonale si conferma uno strumento moderno per la manutenzione Preventiva. Il Laser Doppler rende possibile questa trasformazione.

Gianmarco Liotto⁽¹⁾, Giuseppe Capasso⁽²⁾, Cosimino Corona⁽³⁾

⁽¹⁾ Optodyne Laser Metrology srl liotto@optodyne.it
⁽²⁾ Alenia, Divisione Aeronautica gcapasso1@aeronautica.alenia.it
⁽³⁾ Alenia, Divisione Aeronautica ccorona@aeronautica.alenia.it

Abstract

Nella moderna competizione è sempre più richiesta la progettazione e la costruzione di apparecchiature per la costruzione automatica di oggetti, anche di tipo complesso, come la carlinga dei velivoli. Sono richieste apparecchiature sempre più sofisticate, più precise e più veloci, ma sempre meno costose. La meccanica massiccia e di precisione è sempre stato il presupposto per soddisfare alla richiesta di precisione, a scapito del costo e della resa dinamica. Con il progredire della potenza di calcolo dei CNC è possibile generare i modelli di errore e correggerli con movimenti opposti. Il limite teorico di questa tecnica è la ripetibilità della meccanica, ma il limite pratico è stato fino ad oggi la difficoltà di misurare gli errori in tempi economicamente ragionevoli. Per mezzo del Laser Doppler è possibile misurare i parametri di errore molto più rapidamente e rendere vantaggioso il ricorso alla correzione elettronica degli errori, incluse le deformazioni angolari delle travi. Vengono riportati in questa memoria i risultati di correzione di un robot di grandi dimensioni (volume di lavoro di 780 m cubi) misurato per mezzo del laser Doppler, corretto con tecniche matriciali e vettoriali per mezzo 52 tabelle di compensazione in tutta l'area di lavoro. L'errore residuo, misurato con la tecnica volumetrica diagonale rispondente alla nuova norma ISO 230-6, è inferiore alla variazione dimensionale per effetti termici. La misura dimensionale delle diagonali del volume di lavoro (veloce da realizzarsi) verrà utilizzato come riferimento di stabilità per la determinazione di eventuali azioni di manutenzione.

Introduzione

Le apparecchiature di costruzione automatica, nella fattispecie le macchine utensili CNC ed i Robot Cartesiani, ma anche le macchine di Misura CMM devono necessariamente essere sia Precise sia Veloci, ma anche e soprattutto Economiche. Il prezzo della costruzione di attrezzature complesse per la costruzione dei prodotti si trasforma in aumento di produttività ed aumento della ripetitività del prodotto e quindi in una migliore e costante qualità. Anche la qualità è un risparmio dal momento che si riducono i costi a valle del processo produttivo, come manutenzione e controllo di sicurezza. La velocità è legata alla riduzione dell'inerzia e quindi dei pesi. I nuovi materiali compositi, ceramici, leghe di alluminio, titanio possono risolvere il problema peso, ma sono spesso troppo costose e non abbastanza robuste per applicazioni pratiche nell'industria meccanica. Per la costruzione di grandi macchinari sono le preferite le leghe ferro carbonio in manufatti elettrosaldati per aumentare il momento d'inerzia e ridurre il peso.

La costruzione di macchine precise ad assi cartesiani è basata sulla capacità di produrre e installare strutture e guide di scorrimento, che a dispetto della forza di gravità, devono essere perfettamente rettilinee e perpendicolari tra di loro. In alternativa alla precisione assoluta della meccanica si stanno affermando metodi alternativi basati sulla elettronica e sui servomeccanismi. Si tratta di annullare elettronicamente l'errore prodotto dalla meccanica fornendo al controllo nuove quote di posizionamento, che spingano la macchina nella posizione corretta. La compensazione elettronica mediante tabelle è stata largamente utilizzata da costruttori di macchine CMM, che in questo modo hanno superato il compromesso tra precisione e struttura massiccia. Sulle macchine CMM, con il supporto di potenti elaboratori elettronici vengono compensati fino a 21 errori, ottenendo precisioni di alcuni micrometri su macchine anche di grandi dimensioni. Questa tecnica è ormai sperimentata da molti anni ed ora, con la possibilità dei moderni controlli numerici, che contengono la possibilità di generare compensazioni elettroniche multi-asse, sincronizzate e

condizionate. Sincronizzata è una compensazione che viene applicata in una direzione diversa dal movimento dell'asse che si sta compensando, e viene usata per compensare ad esempio, l'errore di rettilineità verticale o orizzontale. Condizionata è una compensazione il cui valore dipende sia dalla posizione in cui si trova l'asse da compensare lungo la sua direzione, che dalla posizione degli assi da cui è trasportato. Ad esempio in posizionamento di un asse a sbalzo su cui è montato un ulteriore asse lineare, l'errore di posizionamento dipende sia dalla posizione dell'asse orizzontale x sia dalla posizione dell'asse verticale Z, secondo la seguente formula

$$E_p(x,z) = E(x) + \theta(x) * Z \quad (1)$$

Dove:

$E_p(x)$ è l'errore di posizionamento totale sulla punta dell'utensile

$E(x)$ è l'errore alla posizione (x) lungo l'asse di scorrimento

$\theta(x)$ è l'errore angolare (Beccheggio) dell'asse X alla posizione (x) espresso in radianti

Z è la distanza della punta dell'utensile dalla guida di scorrimento (Abbe offset)

Ne consegue che, se l'errore dovuto alla deviazione angolare $[\theta(x) * Z]$ è apprezzabile rispetto all'errore di posizionamento lineare di base $[E(x)]$, per la compensazione lineare dell'asse X potrebbe non essere sufficiente una sola tabella di compensazione, per compensare in tutti i punti l'area di lavoro. Alcuni controlli per macchina utensile permettono di utilizzare più di una tabella per ogni asse permettendo alle tabelle di sommarsi o di moltiplicarsi in modo da generare compensazioni appropriate in tutti i punti dell'area di lavoro. Il limite alla precisione è dato dalla ripetibilità della macchina ma il limite pratico, fino ad oggi, è stato quello di ottenere dati di errore in maniera precisa ed in un tempo economicamente ragionevole. Potendo misurare, correggere e controllare in poco tempo il processo di compensazione diventa economicamente competitivo rispetto al processo di costruzione e si può integrare in esso. Durante la fase di costruzione fisica dei manufatti e la posa in opera degli stessi, gli errori sono tenuti sotto controllo e corretti. La riduzione degli errori dimensionali e geometrici durante la fase di costruzione fisica necessita di tempo, che è in proporzione esponenziale rispetto al risultato di precisione che si vuole ottenere. Il compromesso ottimale è di costruire in modo accurato, ma lasciare alla compensazione elettronica il compito di raggiungere le precisioni richieste dai capitolati. La strumentazione elettronica di misura che può riassumere le doti di precisione e rapidità di misura si è dimostrata essere l'interferometro laser Doppler LDDM (Laser Doppler Displacement Meter) prodotto da Optodyne.

UN CASO PRATICO l'impianto SAFA presso ALENIA a Nola (Napoli)

La costruzione di fusoliere di grandi dimensioni per i velivoli di nuova generazione, come ad esempio il nuovo velivolo do 700 posti A380 prodotto dal consorzio Europeo AERBUS, necessita di apparecchiature automatiche per ridurre i tempi costruttivi; le fusoliere devono essere anche molto precise perché parti assemblate al montaggio finale sono provenienti da vari stabilimenti in Europa.

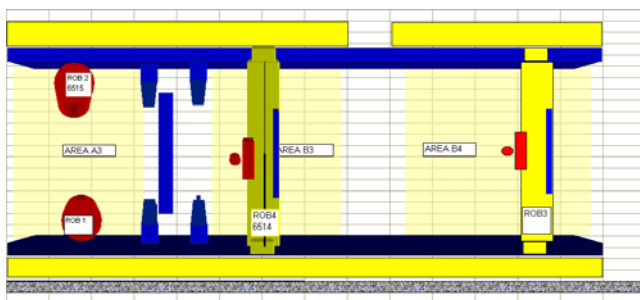


Fig1 :

SAFA robots Alenia NOLA
Visto dall'alto
dimensioni 50m x10m x 9m altezza

Il Robot cartesiano di grandi dimensioni è prodotto da Bisich & Carrù di Torino, è lungo oltre 50m e alto 9m, contiene 4 unità operative indipendenti, due verticali e due portali, ognuno con una testa a 3 assi rotanti. La costruzione è composta da elementi prefabbricati e da una struttura di sostegno elettrosaldata costruita direttamente nel cantiere locale. All'interno di questa struttura trovano posto 3 Aree di lavoro nelle quali vengono collocate le parti di fusoliera da lavorare, trasportate da giganteschi carrelli attrezzati con supporti calibrati. In questo impianto è stato scelto di utilizzare in maniera massiccia la compensazione elettronica della deformazione strutturale in modo da rendere l'impianto preciso e poterlo mantenere preciso anche in caso di inevitabili assestamenti del terreno e delle fondazioni. La misura degli errori residui, per mezzo della misura volumetrica diagonale (UNI-ISO 230-6), rende possibile il monitoraggio rapido delle condizioni dell'impianto rendendo praticabile la manutenzione preventiva.

Mezzi software di Compensazione

Gli assi di ognuno dei 4 attuatori sono comandati da controllo numerico Siemens 840D il quale permette di interagire sulle posizioni teoriche programmate di lavorazione derivate da un sistema CAD/CAM con molte diverse opzioni. Su ognuno dei controlli sono state usate le seguenti:

- N° 2 Compensazioni del fattore di scala (per uniformare gli assi gantry X1,X2)
- N° 3 Tabelle di compensazione passo vite (per sincronizzare gli assi gantry X1,X2 e sgrassare l'asse Y)
- N° 5 Compensazioni degli errori di inversione (X1,X2, Y, Z)
- N° 52 Tabelle di Compensazione incrociata con concatenazione fino a 3 livelli
(X funzione della posizione di Z e della posizione di Y)

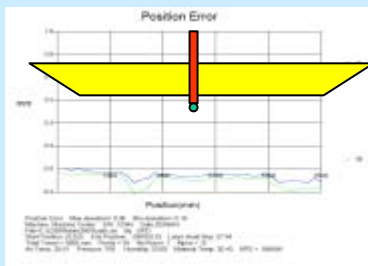
In totale sono stati usati più di 1800 punti di compensazione

Strategia di compensazione

Date le dimensioni della macchina e gli errori di partenza relativamente elevati si è proceduto alla compensazione a livelli sovrapposti; sono stati gradualmente misurati gli errori dei singoli gradi libertà nelle diverse posizioni dello spazio del volume di lavoro, compensati e rimisurati per verifica. Al termine come verifica globale sono state effettuate misure di posizionamento sulla diagonale del volume di lavoro.

Tabella 1: Errori misurati individualmente Prima e Dopo la compensazione (Robot R4 settore B3)

Tipo di errore	Asse	Posizione di misura	Prima della compensazione	Dopo la compensazione	Miglioramento
Rettilinearità verticale	X1	0- 10 m	0,65 mm Sulla guida	0,25 mm punta utensile	260 %
Rettilinearità orizzontale	X1	0 - 25m	1,75mm Sulla guida	0,1mm (0-10m) punta utensile	1750 %
Errore di posizionamento	X	sull'utensile Z=300 Y=0 (centro corsa alto)	0,71 mm	0,1 mm	710 %
Errore di posizionamento	X	sull'utensile Z=1400 Y=0 (centro corsa basso)	1,57 mm	0,2mm	875 %
Errore di posizionamento	X	sull'utensile Z=1400 Y=2500 (estremo laterale basso)	-	0,2 mm	-

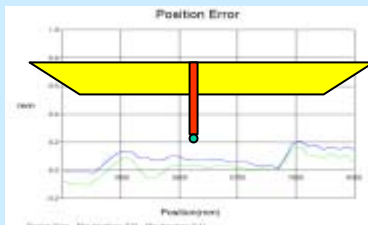
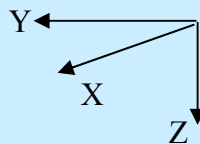


Z=300 y=0
Ycentro, Z alto

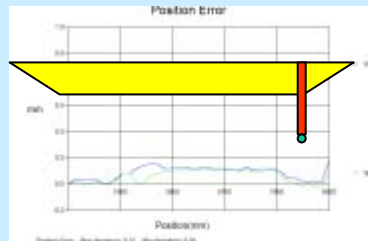
Massimo errore

0,1mm monodirezionale

0,2 mm bidirezionale



Ycentro, Z basso Z=1400 y=0



Z=1400 y=-2500

Y laterale Z basso

FIG.2:

Errori residui di posizionamento lungo l'asse X in 3 diverse posizioni dell'area di lavoro. Su ogni grafico viene schematizzata la traversa e l'asse verticale Z, al termine del quale si trova la punta dell'utensile.

Si nota che gli errori di posizionamento dovuti ad errori angolari, che prima della compensazione producevano errori fino a 1,57mm con differenze di 0,9mm, sono ridotti a 0,2mm con differenze di 0,1 mm, rendendo gli errori nell'area di lavoro bassi ed uniformi.

Verifica dei risultati della compensazione e misura volumetrica diagonale

La misurazione errori fatta individualmente è molto lunga e complessa. In alternativa può essere misurata la precisione di posizionamento lungo le diagonali del corpo macchina, che 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. Inoltre, i dati di precisione volumetrica possono essere adoperati come campione per controlli di manutenzione preventiva. Nel caso specifico la misura della precisione volumetrica su diagonali lunghe 10m è stata inferiore alle 4 ore. Gli errori misurati sulla diagonale possono essere considerati una media quadratica dei 12 singoli errori base, per cui è una buona approssimazione considerare la tolleranza sulla precisione diagonale 3,45 volte (radice quadrata di 12) superiore alla tolleranza dei singoli errori.

Fig. 3: Risultati della misura diagonale

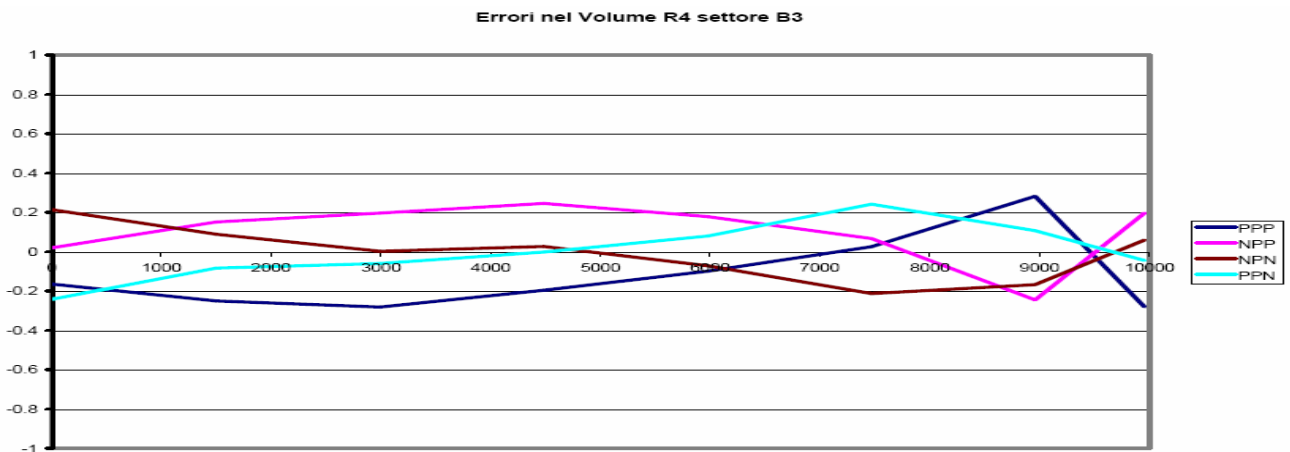


Fig. 4 : Misura di posizionamento volumetrico diagonale sul portale R4



Strumenti adoperati:

Optodyne -MCV 500 sistema di misura lineare compatto, singolo raggio e singola apertura.
Optodyne -MCV 4000 Dual Beam Laser Calibration System, che include Quad detector e pentaprisma per la Misura di Rettilinearità e squadra.

Conclusioni

Sono stati usati nuovi metodi elettronici di supporto alla meccanica, per raggiungere l'obiettivo di posizionare la punta dell'utensile dove necessario per la lavorazione con la precisione necessaria.

Per avere un paragone assoluto di giudizio del valore della precisione ottenuta è stata usata la temperatura. La precisione ottenuta, $\pm 0,2$ mm su dieci metri, ovvero la dimensione del pezzo da lavorare, equivale alla dilatazione termica per una variazione di 4°C , considerata ininfluenza per il processo produttivo. La precisione della macchina misurata sulle diagonali in un tempo inferiore alle quattro ore per ogni postazione di lavoro, viene mantenuta come indicatore dello stato dell'impianto (dal punto di vista della efficienza della struttura meccanica e della sezione di servocontrollo) in modo da poter essere ripetute ciclicamente per programmare eventuali azioni di manutenzione prima che vengano prodotte parti fuori specifica. Il risultato è stato possibile per la elevata ripetibilità della precisione di posizionamento della macchina, per la versatilità del controllo numerico e per la praticità di utilizzo unita alla precisione dei sistemi di misura utilizzati.

Riferimenti e bibliografia

- [1] **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.
 - [5] **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.
 - [6] **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.
 - [7] **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
 - [8] **Liotto, G** "Metodo Vettoriale per la misura degli errori di posizionamento e di rettilinearità 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
 - [9] **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
 - [10] **Charles Wang and Gianmarco Liotto** "Measurement of 18 positioning errors using a simple laser Doppler displacement meter "International Symposium on Precision Mechanical Measurements.(ISPMM'2004) Aug. 24~28, 2004,Beijing. China
 - [11] **Gianmarco Liotto and Charles Wang** "Straightness measurement of a long guide way comparison of dual-beam laser technique and optical collimator" International Symposium on Precision Mechanical Measurements.(ISPMM'2004) Aug. 24~28, 2004,Beijing. China
-