
	Subject: Misurazioni di planarità con laser a scansione	Autori: Renato Ottone e Liotto Gianmarco
	Nota di Informazione Tecnica	Stampato il: 2010-10-14

1. SINTESI

Questo documento, preparato in collaborazione da Renato Ottone e da Gianmarco Liotto, riguarda la stima dell'incertezza di misura da associare a misurazioni di planarità realizzate con l'impiego del laser a scansione HAMAR LASER.

Il campo specifico di applicazione è quello della misurazione della planarità del percorso descritto dagli assi coordinati di macchine utensili di grandi dimensioni.

Lo scopo è quello di definire le principali componenti per poter comporre un budget di incertezza di primo livello, utilizzando un metodo semplificato.

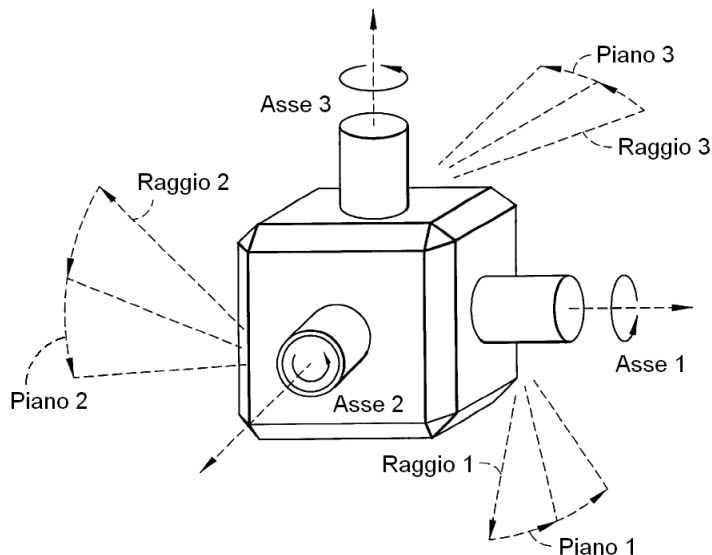


Figura 1 Estratta dal brevetto Hamar US6292303

2. PRINCIPIO DI MISURA

Lo strumento è provvisto di un emettitore equipaggiato con tre assi, rotanti a velocità regolabili tra 1 e 3 giri/min, dai quali fuoriesce un raggio laser collimato ortogonale agli assi di rotazione (Figura 1). La sorgente è composta da un unico diodo laser con lunghezza d'onda di 635 nm, che attraversa due separatrici al 30% ed al 50% per ottenere 3 raggi divergenti, orientati a 90° tra di loro, mediamente paralleli ai rispettivi assi medi di rotazione.

Un pentaprisma di precisione, localizzato in ciascuno dei tre elementi rotanti, riflette il raggio a 90° rispetto al raggio incidente. I raggi rotanti generano tre piani ottici di riferimento, mutuamente ortogonali. L'intensità dei raggi permette di eseguire misurazioni ad una distanza massima di 30 m dal generatore.

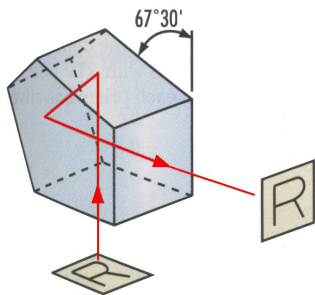


Figura 2 Pentaprisma

Il ricevitore è un PSD (Position Sensing Device) ad alta risoluzione, capace di generare segnali che identificano la posizione del centro di energia del raggio laser incidente. Il ricevitore è dotato di hardware e software capaci di condizionare e pre-elaborare opportunamente i segnali del PSD fornendo, via radio, informazioni direttamente correlate alla posizione del raggio laser incidente rispetto alla base del ricevitore stesso, già integrate su un numero programmabile di letture singole.

Nelle applicazioni per misurazioni su macchine utensili, l'allestimento viene realizzato in modo da riprodurre, quanto possibile, la posizione relativa tra l'utensile e il pezzo in lavorazione. Nel caso specifico analizzato, il ricevitore è posizionato solidarmente alla testa porta mandrino. Secondo le specifiche del costruttore, l'allineamento tra il ricevitore e l'emettitore deve essere mantenuto entro $\pm 10^\circ$ orientando opportunamente il ricevitore stesso sul suo asse di rotazione.

L'accuratezza del sistema di misura è influenzata, oltre che dalle caratteristiche metrologiche del ricevitore, dalle seguenti componenti principali: (i) perpendicolarità dell'asse di rotazione del ricevitore rispetto al piano ottico di riferimento; (ii) caratteristiche geometriche dell'asse di rotazione dell'emettitore, con particolare riguardo al moto di errore assiale e – soprattutto – ai moti di errore di inclinazione; (iii) accuratezza del pentaprisma; (iv) allineamento del pentaprisma all'asse medio di rotazione e (v) variazioni di tali componenti al variare della temperatura.

Occorre inoltre considerare che piccolissime variazioni di assetto sul trasmettitore possono produrre significative variazioni di rilevamento sul ricevitore; (ad esempio, una variazione di soli 0,001/1000 produrrà una variazione di 0,015 mm per una distanza di misura di 15 m).



3. CARATTERISTICHE METROLOGICHE DELLO STRUMENTO

Le caratteristiche metrologiche dello strumento sono reperibili sui siti www.hamarlaser.com e www.hamarlaser.it per la serie di strumenti L-740 e devono essere interpretate come valori massimi in assenza di vibrazioni, variazioni di assetto sul trasmettitore provocate da masse in movimento e variazioni prodotte dalla rifrazione e dalla turbolenza dell'aria.

3.1 Stabilità del raggio al variare della temperatura del gruppo emettitore

3.1.1 Stabilità di traslazione (deriva termica nella direzione parallela all'asse di rotazione)

L'errore massimo per questa caratteristica è di 0,005 mm per un gradiente termico temporale di 1 °C/h. Si tratta dell'intervallo completo dell'errore in quanto il suo segno è correlabile alla perturbazione termica.

3.1.2 Stabilità di inclinazione

L'errore massimo (MPE, Maximum Permissible Error) per questa caratteristica è di 0,36" (0,001745/1000 ovvero 1,745 µrad) per un gradiente termico temporale di 1 °C/h. Si tratta della semiampiezza dell'errore ammesso in quanto il suo segno non è correlabile alla perturbazione termica.

3.2 Rettilineità del raggio

L'MPE dichiarato è di 0,0008/1000 ovvero 0,8 µrad. Questa caratteristica è rilevante unicamente per misurazioni di rettilineità con il misurando allineato al raggio singolo: non deve essere considerata nella valutazione dell'incertezza di planarità in quanto il suo effetto è già compreso nelle specifiche di planarità del piano ottico di riferimento.

3.3 Planarità del piano ottico di riferimento

3.3.1 Traslazione (moto di errore assiale dell'asse medio di rotazione e residuo di disallineamento del pentaprisma)

L'MPE per questa caratteristica è di ± 0,0013 mm ed è indipendente dall'ampiezza dell'angolo di misura.

3.3.2 Inclinazione (moto di errore di inclinazione dell'asse medio di rotazione e disallineamento residuo del pentaprisma rispetto all'asse medio di rotazione)

L'MPE per questa caratteristica è di 0,5" (0,00242/1000 ovvero 2,42 µrad) per angoli di misura di 180° o maggiori. Per angoli di misura di 90° tale valore si dimezza.

Si può ragionevolmente considerare che per angoli di misura di 45° questo errore sia ancora minore e che la sua riduzione sia proporzionale alla riduzione dell'angolo di misura. Il suo valore non sarà comunque minore di 0,0008/1000 ovvero 0,8 µrad (Vedi 3.2).

3.4 Caratteristiche del ricevitore A-1520

3.4.1 Risoluzione

Questo ricevitore è dotato di hardware e software sofisticati per il trattamento del segnale. La risoluzione interna del sensore è molto spinta ed il risultato fornito è la media risultante dall'integrazione programmabile di letture multiple ma l'informazione trasmessa ha comunque a risoluzione di 0,001 mm.

3.4.2 Accuratezza

L'escursione massima dichiarata per questa caratteristica è di 0,0015 mm. L'MPE corrispondente è quindi di ± 0,00075 mm.

3.5 Composizione delle caratteristiche metrologiche dello strumento

Al fine di facilitare la stima di primo livello dell'errore strumentale in funzione della distanza di misura e dell'angolo di scansione vengono qui proposte la formulazione della composizione delle caratteristiche metrologiche dello strumento e la rappresentazione grafica del massimo errore specificato dal costruttore per scansioni limitate a 90° e scansioni oltre 180°.

Per questo approccio semplificato si considera che lo strumento sia stato sottoposto ad un preriscaldamento di un'ora e che le condizioni termiche ambientali siano tali da poter considerare non rilevanti le specifiche di stabilità del raggio definite in 3.1. Si considera inoltre che la specifica in 3.2 sia compresa nella specifica di planarità dettagliata in 3.3.

3.5.1 Per angolo di scansione inferiore a 90°

$$\text{MPE}_{P,90^\circ} = \pm (0,75 + 1,3 + 1,21 \cdot D) [\mu\text{m}] \quad (1)$$

dove D è la distanza di misura espressa in metri.

3.5.2 Per angolo di scansione prossimo a, o maggiore di 180°

$$\text{MPE}_{P,180^\circ} = \pm (0,75 + 1,3 + 2,42 \cdot D) [\mu\text{m}] \quad (2)$$

dove D è la distanza di misura espressa in metri.

La Figura 3 riporta la rappresentazione grafica delle equazioni (1) e (2), utile per la stima preliminare dell'errore strumentale.

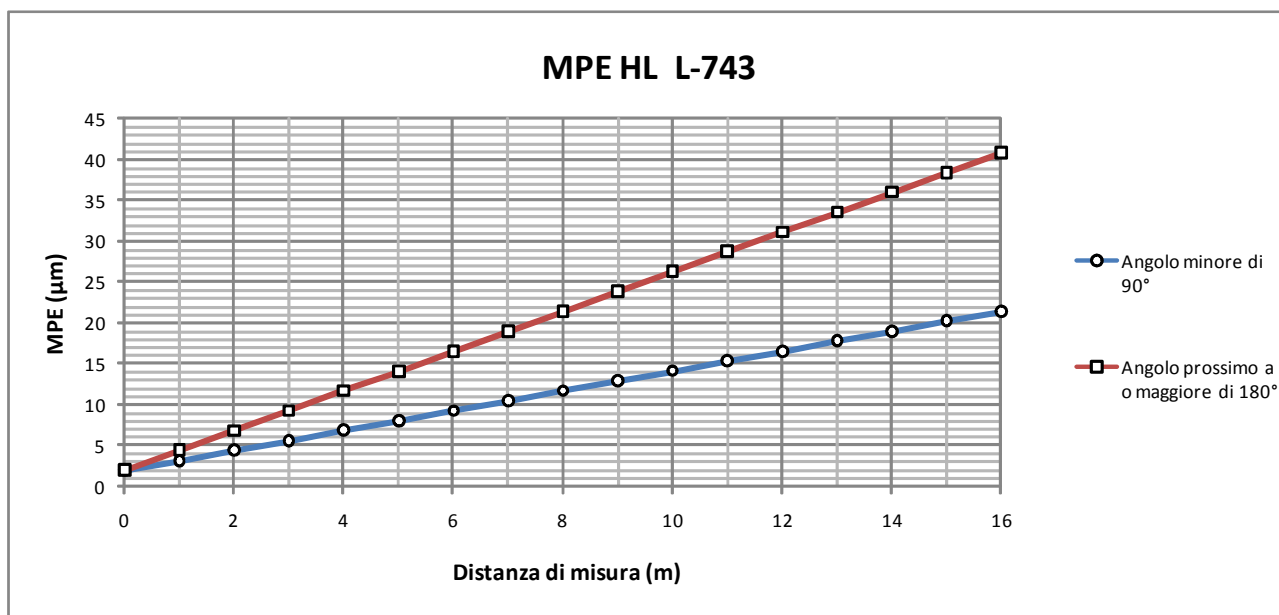


Figura 3 – Errore strumentale ricavato dalle specifiche del laser L-743



Lo strumento utilizzato è corredato di un "Calibration Certificate" che – pur non essendo utilizzabile direttamente come certificato di taratura in quanto manca l'indicazione dell'incertezza di misura – riporta errori strumentali angolari, per scansioni di 180°, pari a circa la metà dell'MPE specificato. Si può desumere che, se lo strumento ha mantenuto le sue caratteristiche metrologiche, le componenti angolari possano ragionevolmente essere divise per 2 ottenendo le seguenti formule:

$$\text{MPE}_{P,90^\circ} = \pm (0,75 + 1,3 + 0,6 \cdot D) [\mu\text{m}] \quad (1C)$$

$$\text{MPE}_{P,180^\circ} = \pm (0,75 + 1,3 + 1,21 \cdot D) [\mu\text{m}] \quad (2C)$$

dove D è la distanza di misura espressa in metri.

4. LA RIFRAZIONE

Per misurazioni realizzate in ambiente di officina, l'approssimazione per la quale si considera che i raggi luminosi si propaghino in linea retta, a velocità costante, non è valida.

In ambiente reale, un raggio di luce (ed anche il raggio laser) percorrerà lo spazio tra A e B seguendo una traiettoria curva, mostrata schematicamente in Figura 4, ad una velocità $c' < c$. Se non si apportassero correzioni, la posizione apparente di B sarebbe in B', con un errore di misura e.

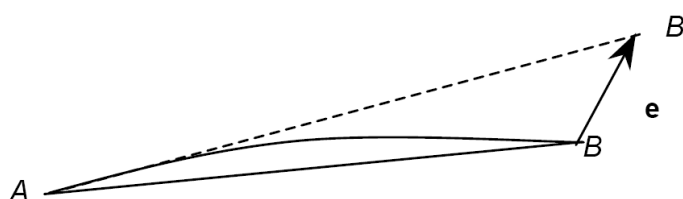


Figura 4 – Errore di rifrazione e

Se l'indice di rifrazione dell'aria ambiente $n(r, t)$ fosse noto in funzione della posizione e del tempo, il percorso ottico del raggio potrebbe essere calcolato e l'errore e potrebbe essere corretto. In pratica, la conoscenza dell'indice di rifrazione su volumi di lavoro importanti è normalmente molto limitata e questo pone un limite alla riduzione dell'incertezza di misura in applicazioni metrologiche.

Per esempio, per un raggio che propaghi nella direzione X, l'effetto principale è, in prima approssimazione, una rifrazione proporzionale ai gradienti $\delta n/\delta y$ e $\delta n/\delta z$ ortogonali alla direzione di propagazione.

Considerando questi gradienti ragionevolmente costanti lungo la traiettoria del raggio, lo scostamento del raggio dalla linea retta è parabolico e l'errore di rifrazione accumula quadraticamente.



Il termine dominante è dovuto al gradiente di temperatura $\alpha = dT/dz$. Per un gradiente di 1 °C/m, l'errore di rifrazione sarà prossimo a 4,6 mm per una distanza di 100 m. Nel caso generale occorre tener conto anche dei gradienti orizzontali.

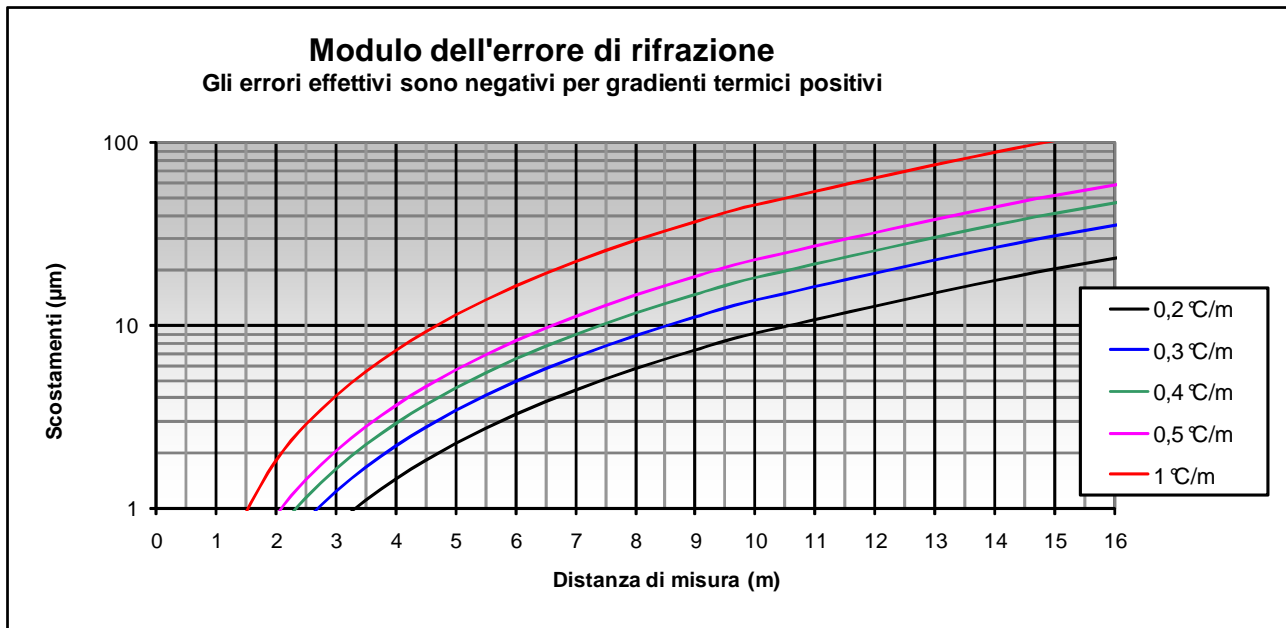


Figura 5 – Rappresentazione grafica dell'errore di rifrazione per differenti gradienti termici



Nel caso specifico, tenendo conto del riscaldamento per irraggiamento, il gradiente termico stimato è di 0,2 °C/m. La formula da utilizzare per il calcolo dell'errore di rifrazione è la seguente:

$$e = 4600 \cdot (D/100)^2 \cdot \alpha \quad (3)$$

dove D è la distanza di misura in metri e α è il gradiente termico in °C/m

4.1 Caso pratico della misura di planarità o rettilineità

Gli errori di curvatura del raggio laser che attraversa un ambiente con aria stratificata si applicano completamente solo alle misure di pendenza rispetto all'orizzonte (piano a gravità costante). Il raggio laser è alla partenza parallelo al piano di gravità costante ma al termine della traiettoria subisce una deviazione, che è la deviazione rispetto al piano di gravità costante, altrimenti detto errore di puntamento.

Nel caso di misurazione di errore di rettilineità o planarità l'unica componente che disturba la misura è la curvatura del raggio non la sua pendenza, che viene cancellata dall'allineamento e o dal calcolo del piano medio. In altre parole la quantità che disturba è solo la freccia dell'arco parabolico.

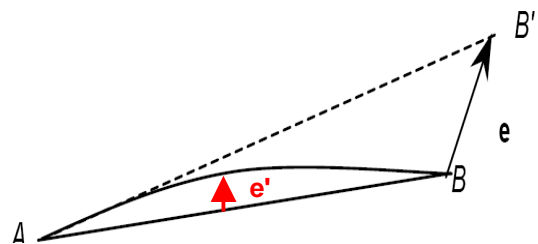


Figura 4.1- Errore di rettilineità aggiustata (Adjusted Staughtness) e'

La formula approssimata di calcolo dell'errore è la seguente:

$$e' = 4600 \cdot \alpha \cdot [(D/2/100)^2 - \frac{1}{2} (D/100)^2] \quad \square \quad [\text{micrometri}] \quad (3a)$$

per cui applicando la formula ai valori del grafico di Fig 5 abbiamo i seguenti risultati:

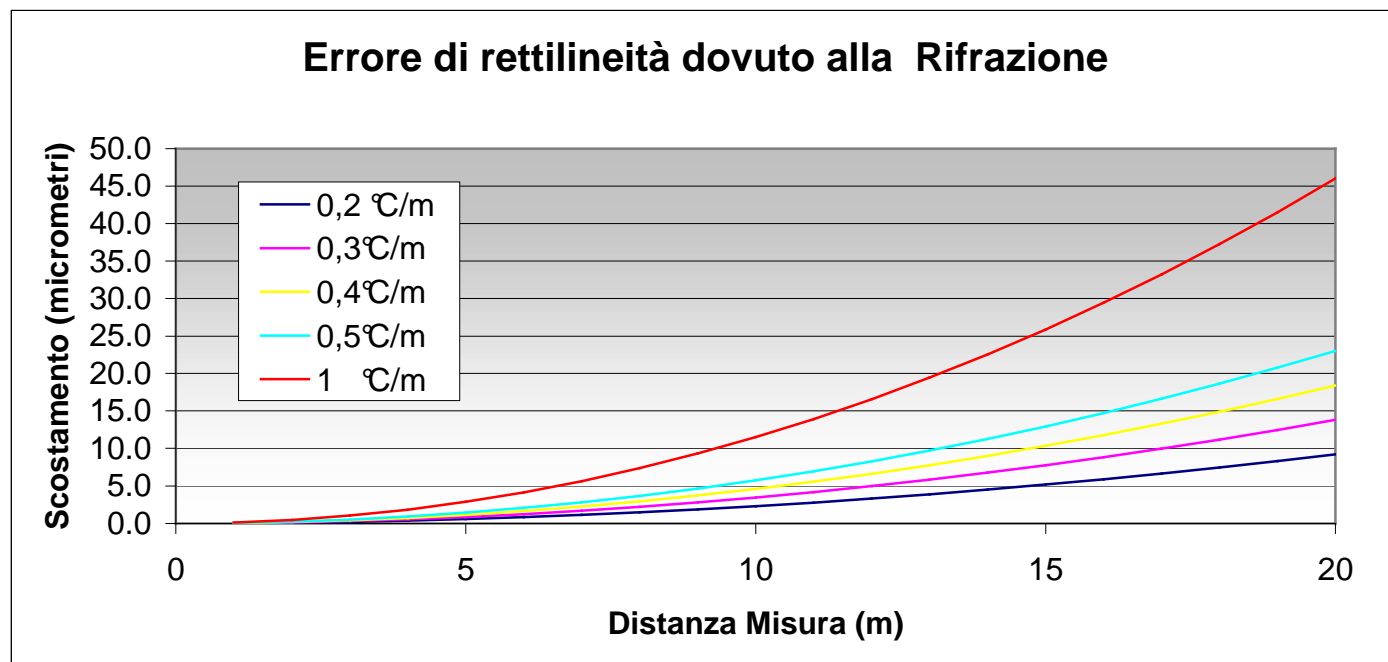


Figura 5 – Rappresentazione grafica dell'errore di rettilineità dovuto alla rifrazione per differenti gradienti termici

5. LA TURBOLENZA

Variazioni dinamiche della densità dell'aria lungo il percorso ottico tra il trasmettitore e il ricevitore generano variazioni nella direzione e nella velocità di propagazione del raggio laser e producono letture instabili ed erratiche.

Si ritiene che, in un determinato ambiente, l'ampiezza della fluttuazione aumenti approssimativamente con $D^{3/2}$ per una distanza di misura D .

Non è possibile stimare a priori l'ampiezza del disturbo sulla lettura provocato dalla turbolenza: essa deve essere misurata in loco e devono essere poste in atto azioni che tendano a minimizzarla tra e quali si annoverano:

- riduzione della velocità di scansione;
- aumento del numero di integrazioni;
- eliminazione di disturbi periodici e casuali come: (i) l'accensione e lo spegnimento dei ventilatori del sistema di condizionamento dell'ambiente, (ii) l'effetto di eventuali ventilatori a bordo macchina, (iii) l'apertura e chiusura di portoni in prossimità del volume di misura;
- la miscelazione dell'aria ambiente per mezzo di ventilatori orientati parallelamente al percorso compreso tra l'emettitore ed il ricevitore.
- L'acquisizione del singolo dato di misura tendenzialmente mediato sull'intervallo osservato dell'oscillazione.

La letteratura specializzata sconsiglia l'uso di ventilatori ad alta velocità e alto volume di spostamento disposti trasversalmente rispetto al percorso ottico.

Il movimento trasversale dell'aria non provoca, in principio, alterazioni nella direzione del raggio ma, spostando masse d'aria che possono avere temperature diverse – dovute a eventuali gradienti termici spaziali – si possono provocare alterazioni locali della direzione di propagazione del raggio. Tali alterazioni possono, a loro volta, essere influenzate dalle variazioni di flusso provocate dall'interazione tra i componenti della macchina in movimento ed i ventilatori stessi.

Le misurazioni devono essere ripetute e, per ogni singolo punto di misura, deve essere calcolata la media delle letture ottenute. Per la stima dell'incertezza di misura, il disturbo dovuto alla turbolenza verrà incluso nella componente associata alla ripetibilità di misura.

6. STIMA DELL'INCERTEZZA DI MISURA

Viene qui riportato un budget molto semplificato per la stima e il calcolo, in prima approssimazione, dell'incertezza di misura da associare alla misurazione della planarità del percorso descritto da assi coordinati di macchine utensili di grandi dimensioni.

Vengono considerate unicamente le componenti principali quali: (i) l'errore strumentale (E_S) desunto dalle specifiche e dalla documentazione tecnica fornita dal costruttore dello strumento, (ii) l'errore di rifrazione (E_R) e (iii) la componente associata alla ripetibilità di misura (u_{RIP}).

6.1 Componente dovuta all'errore strumentale

Con riferimento al paragrafo 3.5, tenendo in dovuta considerazione il "Calibration Certificate" fornito dal costruttore dello strumento, l'MPE viene calcolato applicando le equazioni (1C) e (2C).

Assumendo una distribuzione rettangolare, lo scarto tipo u_S viene calcolato con la seguente equazione:

$$u_S = E_S / \sqrt{3} \quad (4)$$

e rappresentato graficamente nella Figura 6.

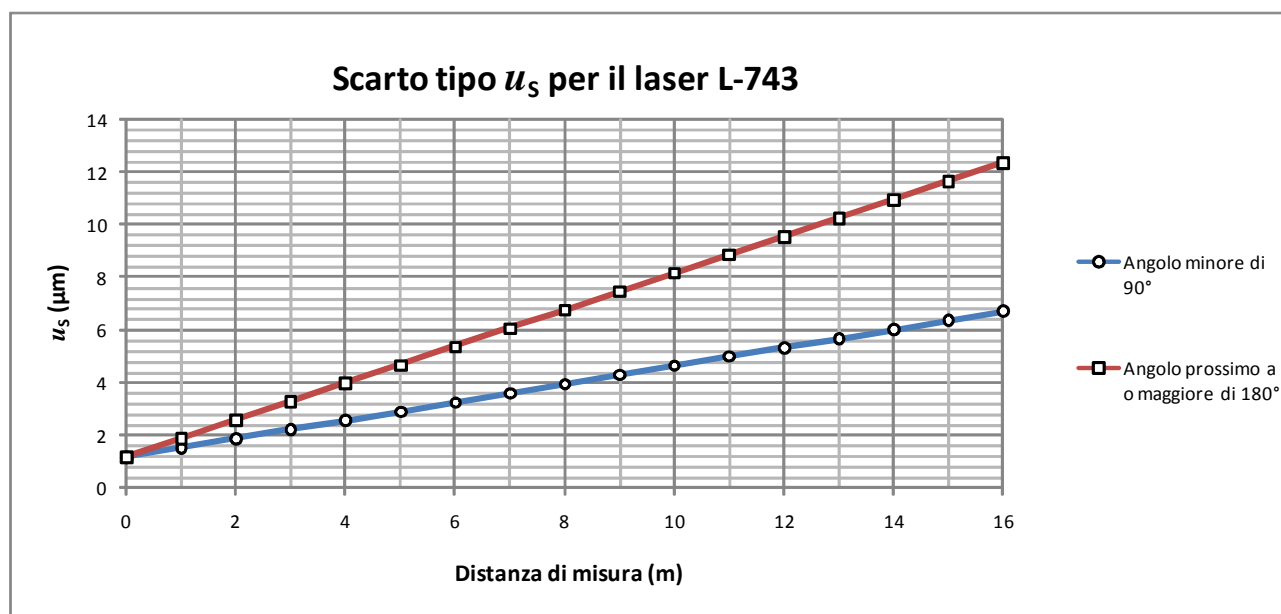


Figura 6 – Rappresentazione grafica di $u_{S,90}$ e $u_{S,180}$



Nel caso specifico, applicheremo $u_{S,90}$ per le misurazioni dei piani coordinati YZ e ZX e applicheremo $u_{S,180}$ per le misurazioni del piano coordinato XY (ove l'angolo di scansione era di 360°)

6.2 Componente dovuta alla rifrazione

Con riferimento al capitolo 4.1 e assumendo una distribuzione rettangolare e che il segno del gradiente termico è conosciuto, lo scarto tipo u_R viene calcolato con la seguente equazione:

$$u_R = E_R / \sqrt{12} \quad (5)$$

e rappresentato graficamente nella Figura 7

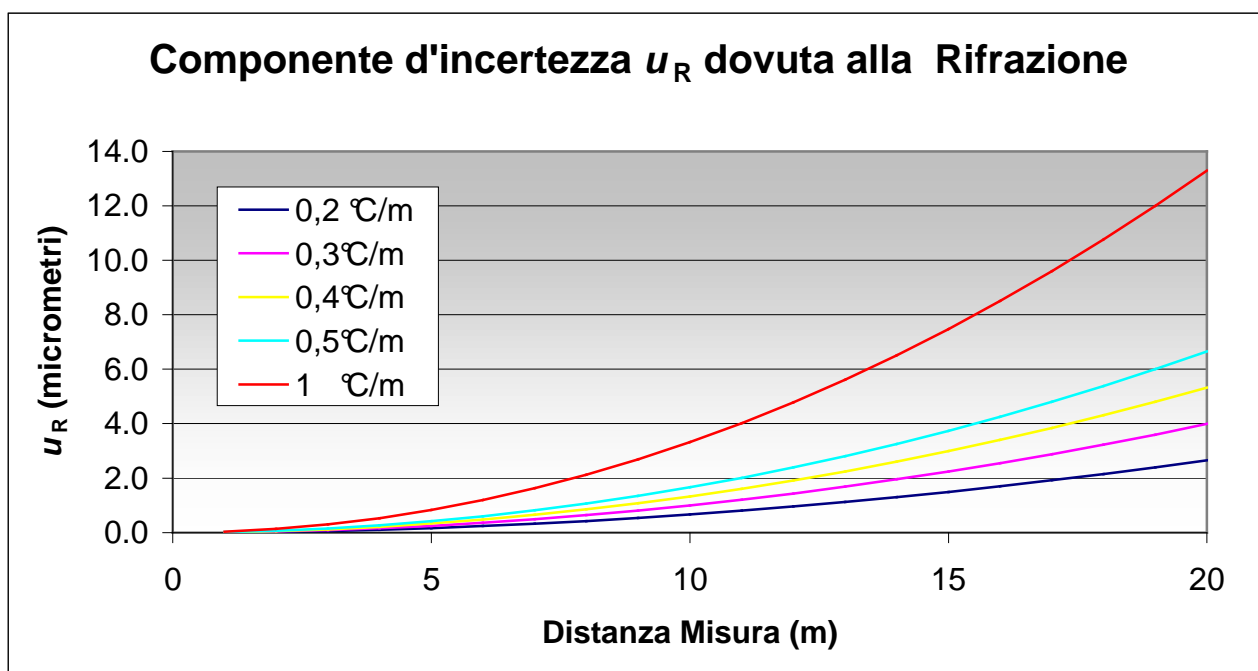


Figura 7 – Rappresentazione grafica della componente u_R dovuta alla rifrazione



Nel caso specifico, tenendo conto dell'effetto del riscaldamento per irraggiamento, utilizzeremo i dati corrispondenti al gradiente termico di 0,2 °C/m.

6.3 Componente associata alla ripetibilità di misura (u_{RIP})

Le misurazioni vengono ripetute 3 volte.

Per ogni singolo punto di misura viene calcolata l'escursione E_M delle elevazioni dei punti ricavati dal piano rappresentativo calcolato dal sistema di misura.

L'incertezza u_{SING} da associare ad ogni singola misura viene calcolata con la seguente equazione:

$$u_{SING} = E_M / \sqrt{12} \quad (6)$$

Viene poi calcolata la media delle 3 letture attribuendo ad essa l'incertezza u_{RIP} calcolata secondo l'equazione seguente:

$$u_{RIP} = u_{SING} / \sqrt{(n-1)}; \text{ per } n=3 \quad u_{RIP} = u_{SING} / \sqrt{2} \quad (7)$$

Occorre considerare che u_{RIP} comprende la componente d'incertezza dovuta alla turbolenza e la componente d'incertezza dovuta alla ripetibilità del ricevitore.

Si tratta inoltre di una ragionevole sovra stima in quanto u_{RIP} comprende anche la ripetibilità della macchina utensile.

6.4 Calcolo dell'incertezza composta u_c

Considerando le tre componenti principali di incertezza non correlate, per il calcolo dell'incertezza composta u_c applicheremo, per ogni singolo punto di misura, l'equazione seguente:

$$u_c = \sqrt{(u_S^2 + u_R^2 + u_{RIP}^2)} \quad (8)$$

6.5 Calcolo dell'incertezza estesa U

Utilizzeremo un fattore di copertura $k = 2$ per un livello di confidenza pari a circa 95% quindi:

$$U = 2 \cdot u_c \quad (9)$$

6.6 Esempio di calcolo

Nel caso specifico, per ogni singolo punto di misura, il sistema fornisce le coordinate del punto sul piano; conoscendo la posizione approssimata dell'emettitore è possibile, utilizzando un foglio di calcolo, stimare la distanza di misura corrispondente rendendo quindi possibile la stima dell'incertezza di misura da associare ad ogni singolo scostamento misurato.

Vengono qui riportati, a titolo di esempio, ed utilizzando unicamente i grafici, la stima dell'incertezza estesa da associare ad un punto di misura sui tre piani coordinati piano coordinati.

Piano XY, distanza tra emettitore e ricevitore pari a 5 m

$$u_S = 4,8 \mu\text{m}$$

$$u_R = 0,2 \mu\text{m}$$

$$u_{RIP} = 2 \mu\text{m} \text{ (ipotizzato)}$$

$$u_c = \sqrt{4,8^2 + 0,2^2 + 2^2} = 5,2 \mu\text{m}$$

$$U = 2 \cdot u_c = \pm 10,4 \mu\text{m}$$

Piano YZ, distanza tra emettitore e ricevitore pari a 3 m

$$u_S = 2,1 \mu\text{m}$$

$$u_R = 0,1 \mu\text{m}$$

$$u_{RIP} = 2 \mu\text{m} \text{ (ipotizzato)}$$

$$u_c = \sqrt{2,1^2 + 0,1^2 + 2^2} = 2,9 \mu\text{m}$$

$$U = 2 \cdot u_c = \pm 5,8 \mu\text{m}$$

Piano ZX, distanza tra emettitore e ricevitore pari a 11 m

$$u_S = 5 \mu\text{m}$$

$$u_R = 0,8 \mu\text{m}$$

$$u_{RIP} = 2 \mu\text{m} \text{ (ipotizzato)}$$

$$u_c = \sqrt{5^2 + 0,8^2 + 2^2} = 5,4 \mu\text{m}$$

$$U = 2 \cdot u_c = \pm 10,8 \mu\text{m}$$

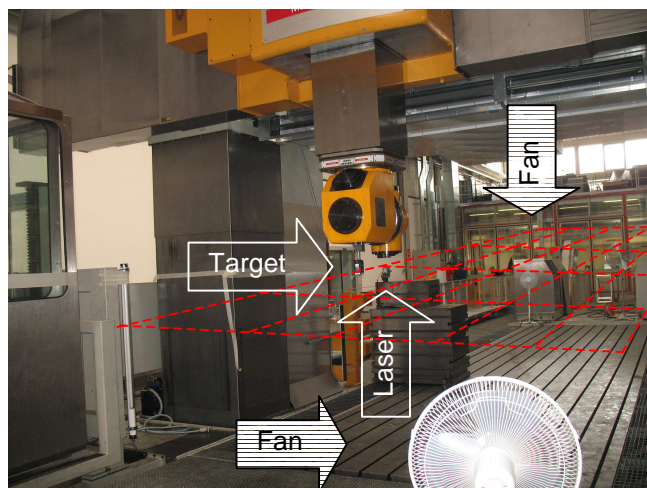


Fig.8 Misura di Planarità piano XY, Il laser L-743 è montato nel centro della macchina, sulla tavola. Il Sensore A1520 è sul mandrino, in posizione verticale. Sono stati usati dei ventilatori per ridurre il disturbo dovuto all'aria.

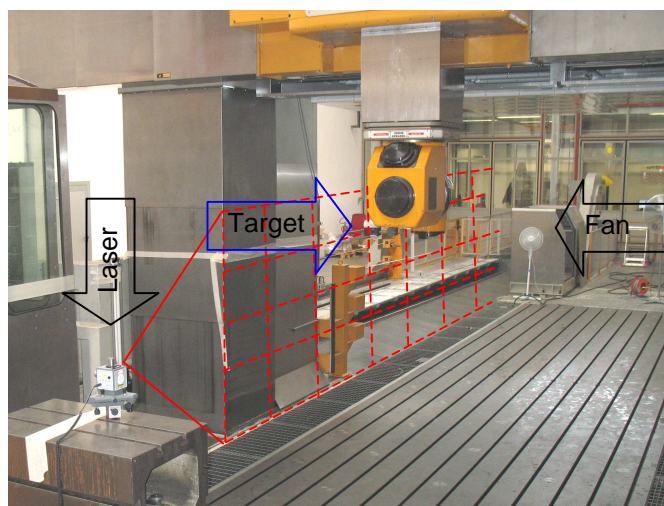


Fig.9 Misura della Planarità del piano XZ, Il laser è montato all'esterno della tavola, il Sensore A-1520 è sul mandrino in posizione orizzontale.

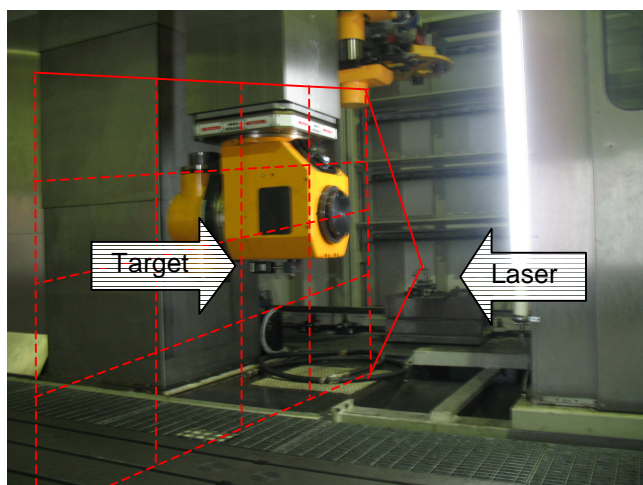


Fig.10 Misura della Planarità del piano YZ, Il laser è montato all'esterno della tavola, il Sensore A-1520 è sul mandrino in posizione orizzontale.