



Università degli Studi di Cassino
Facoltà di Ingegneria

Lezioni del Corso di Fondamenti di Metrologia Meccanica

A.A. 2005-2006 Prof. Paolo Vigo



Università degli Studi di Cassino

Corso di Fondamenti di Metrologia Meccanica

Indice

Introduzione alle misure e collaudi dimensionali
Aspetti metrologici di rilievo nelle misure dimensionali
I campioni di riferimento nel settore dimensionale
Le principali strumentazioni di misura nel settore dimensionale





- Introduzione alle misure e collaudi dimensionali

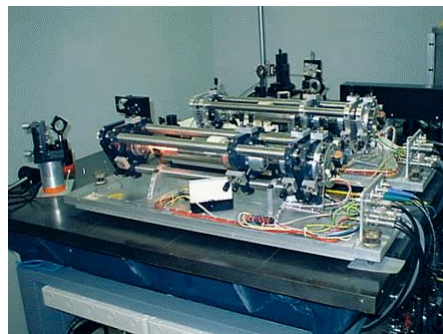


Lunghezza: metro (m)

Il metro è la lunghezza del tragitto compiuto dalla luce nel vuoto in un intervallo di $1/299792458$ di secondo.

La velocità della luce nel vuoto è per definizione:

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



Il campione nazionale è realizzato presso l'IMGC-CNR mediante laser elio-neon stabilizzati per riferimento a transizioni della molecola dello iodio. Il valore della lunghezza d'onda ($\lambda = 632,99139822 \text{ nm}$) è ricavato da una misura di frequenza rispetto al campione di tempo in base alla relazione $\lambda=c_0/f$, con un'incertezza tipo relativa di $2,5 \cdot 10^{-11}$.



Misure di lunghezza:

i metodi di misura (i micrometri)

- Regoli e nastri graduati (1 mm)
- Calibro (1/50 mm)
- Reticolo di diffrazione (1/100mm)
- Palmer (1/1000 mm)
- Microscopio micrometrico (1/1000 mm)



Misure di lunghezza:

sensori di posizione (assoluti) e spostamento (incrementali)

- Sensori di lunghezza:
 - estensimetri
 - potenziometri
 - LVDTs
 - Encoder ottici
 - interferometri laser
 - altri sensori (a variazione di induttanza, di riluttanza, a correnti parassite, capacitivi, piezoresistivi, ultrasonici)
- Sensori d'angolo
 - Encoder ottici (assoluti e incrementali)
 - Synchros e Inductosyns



Misure di lunghezza:
i metodi di misura (CMM)

- Le macchine di misura di coordinate sono costituite da:
 - un tastatore (risoluzione, forza, ...)
 - le guide (rettilineità, ortogonalità, deformabilità, ...)
 - sensori di posizione (interferometro laser, ecc.)
- Le macchine di misura possono essere classificate a seconda dei gradi di libertà nelle misure (macchine 3D, ...)



Misure di lunghezza: le incertezze di misura

- Errori geometrici (posizione, rettilineità, angolo, parallelismo)
- Errori dovuti ad effetti della temperatura
- Errori dovuti a deformazioni elastiche (schacciamento del misurando, deformazione della scala di misura...)
- Errori di correzione



Misure di lunghezza: i campioni primari

- Campioni materiali (campioni a tratti e a facce, blocchetti pp, anelli e tamponi lisci e filettati)
- Campioni ottici (lampada spettrale, dischi interferometrici, laser, righe ottiche)



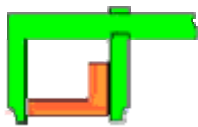
Misure di lunghezza: i metodi di taratura

- Metodi diretti
 - singolo materiale campione tarato
 - differenti campioni per ciascun tipo di errore
- Metodi di autotaratura
 - misure multiple su misurando tarato
 - misure multiple su misurando non tarato

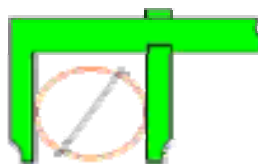


COLLAUDI DIMENSIONALI

Il metodo di misurazione maggiormente utilizzato nelle normali attività industriali rimane ancora quello del confronto, sia diretto, sia indiretto (per trasferimento del campione).

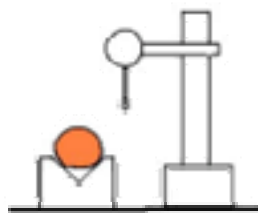


La misurazione avviene quindi per contatto dello strumento su due punti del pezzo, subendo inevitabilmente l'effetto negativo delle caratteristiche della sua superficie (forma e grado di finitura).





La superficie ha la sua influenza anche quando i punti di contatto utilizzati nel procedimento di misurazione sono più di due, come nel caso della misurazione di diametri interni con alesametri a tre punte (con questa metodologia si limita al massimo il problema di individuare per tentativi la misura del diametro e non quella di una corda, facilitando così l'operatore). Ciò avviene anche nel caso dei comparatori.



La necessità di risolvere il problema della correlazione tra dimensioni e forme si è imposta con forza a causa delle esigenze industriali e commerciali di intercambiabilità delle parti.

Sono state quindi prodotte le **norme** che definiscono il sistema di tolleranze geometriche, e le loro relazioni con le tolleranze dimensionali. Il collaudatore in una normale officina ha però a disposizione strumenti differenti per la misurazione di dimensioni e di forme.



Quindi per la verifica dimensionale e geometrica di parti che devono essere accoppiate tra loro si preferisce spesso utilizzare calibri speciali, con la tecnica del **passa – non passa**.

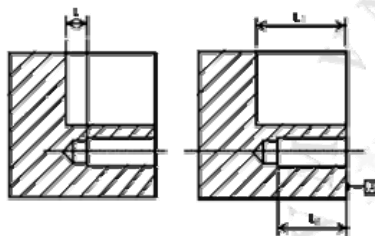
La misurazione è rapida e facilitata, ma l'esito dipende:

- dalla **manualità dell'operatore**
- non sono disponibili informazioni circa le cause di anomalie funzionali.
- è spesso necessario avere a disposizione una notevole quantità di calibri e tamponi, specifici per dimensione e tipologia di applicazione.



Caratteristiche di difficile misurazione

Spesso ci si trova nella necessità di eseguire misurazioni che con le tecniche tradizionali risultano molto difficili (se non fisicamente impossibili), o, comunque affette da elevata incertezza. Nel caso della figura seguente, la dimensione richiesta può essere verificata solo con la sottrazione di due misure di lunghezza non quotate;

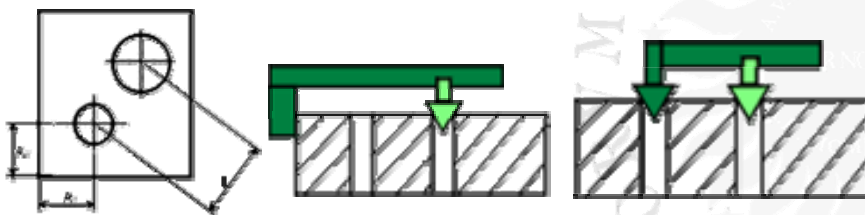


l'incertezza della misura richiesta è calcolata dalla somma quadratica delle incertezze delle misure effettuate, nell'ipotesi di avere a disposizione una superficie di riferimento con adeguate caratteristiche (planarità, parallelismo).



Nel caso della figura seguente, con strumenti tradizionali non è possibile misurare con facilità e precisione la caratteristica "interasse", e ancora peggio sarebbe stato se il progettista avesse voluto vincolare al contorno la posizione di uno dei due fori (dimensioni A1 ed A2).

In questo caso occorre ricorrere a strumenti speciali, che gestiscono le forme delle caratteristiche da misurare, oltre che le loro dimensioni, anche se la loro pratica utilizzazione è limitata a lunghezze di media entità.



Misurazione dei profili

Si pensi ad esempio al caso del controllo del profilo di un vano portiera di autoveicolo, con riferimento a punti di vincolo quali gli attacchi cerniere.

In questi casi, tra le strumentazioni tradizionali, sono disponibili solo le **dime** ed i telai di controllo, dotati di punti di riscontro fissi e di opportuni punti di misurazione.





- Aspetti Metrologici di rilievo nelle Misure Dimensionali



Variazioni di temperatura

La principale variabile in gioco è fornita dalle differenti temperature (del campione, del misurando, della scala) e dai rispettivi coefficienti di dilatazione termica.

Nel bilancio delle incertezze particolare importanza rivestono quindi le misure ausiliarie e la relativa strumentazione.

Generalmente, la relazione tra la temperatura e la lunghezza di un oggetto viene data dalla formula seguente:

$$L_T = L_{20} \cdot \{1 + \alpha(T - 20)\}$$

L_T = lunghezza del blocchetto alla temperatura T;

L_{20} = lunghezza del blocchetto a 20°C;

α = coefficiente di dilatazione termica del blocchetto;

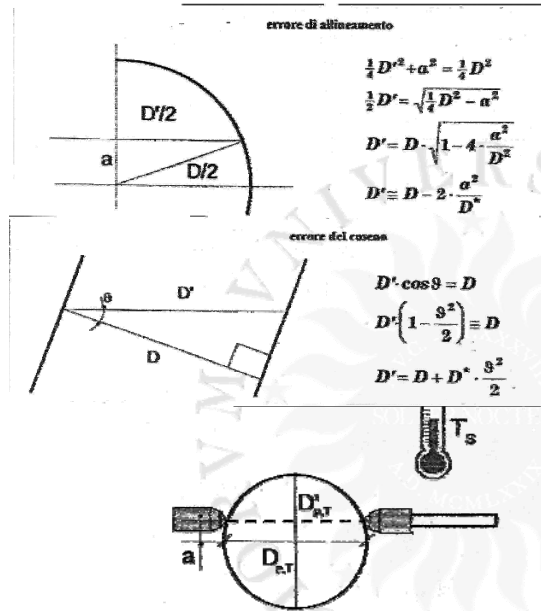
T = temperatura del blocchetto al momento della misura.

**L'errore di Allineamento**

E' dovuto alla presenza di un disallineamento fra la quota da misurare e l'asse della scala. Questo errore dipende dall'angolo di disallineamento (θ) e spesso viene indicato come "errore del coseno" essendo la lettura corretta pari a: $D' \cos(\theta) = D$

attraverso lo sviluppo in serie del coseno la formula precedente diventa pari circa a:

$$\Delta D = D' - D = D \theta^2 / 2$$

**Errore di allineamento:**

E' dovuto alla presenza di un disallineamento fra la quota da misurare e l'asse della scala. Questo errore dipende dall'angolo di disallineamento (θ) e spesso viene indicato come "errore del coseno" essendo la lettura corretta pari a:

$$L^* \cdot \cos \theta = L$$

attraverso lo sviluppo in serie del coseno la formula precedente diventa pari circa a:

$$\Delta L = L^* - L = \frac{1}{2} \cdot L_{nom} \cdot \theta^2$$

che rappresenta la forma usuale con cui viene stimato l'errore di disallineamento



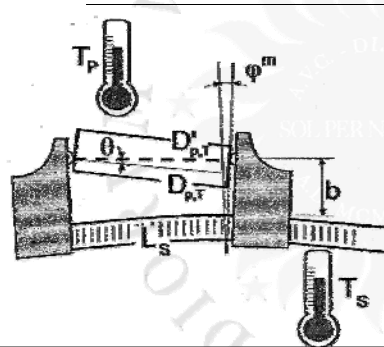
L' Errore di Abbe

La condizione ottimale di misura prevede che l'asse del misurando coincida con l'asse dello strumento (scala). Qualora questa condizione non venga rispettata (avviene praticamente sempre) nasce un errore comunemente chiamato *errore di Abbe*.

Esso è legato alla distanza b tra l'asse di misura dello strumento e l'asse del misurando (*braccio di Abbe*, misurato sul punto di contatto fra strumento e misurando) e dall'angolo ϕ_m tra la superficie di misura e la perpendicolare all'asse.

Il valore assoluto è dato dalla formula seguente:

$$\Delta L = b \phi_m$$



Deformazione elastica dovuta a forze esterne

Per composizioni di blocchetti può essere utilizzato un impacchettatore, per tenere uniti i blocchetti con opportune viti di serraggio (anche ad esempio per le tarature delle macchine 3D CMM).

Una forza eccessiva di serraggio su queste viti determina errori di misura.

La contrazione viene espressa con la formula seguente:

$$\Delta L = \frac{L \cdot P}{E \cdot S}$$

✚ P =forza di fissaggio [N]

✚ S = sezione del blocchetto [m²].

✚ E = modulo di elasticità (m. di Young) del materiale [MPa]

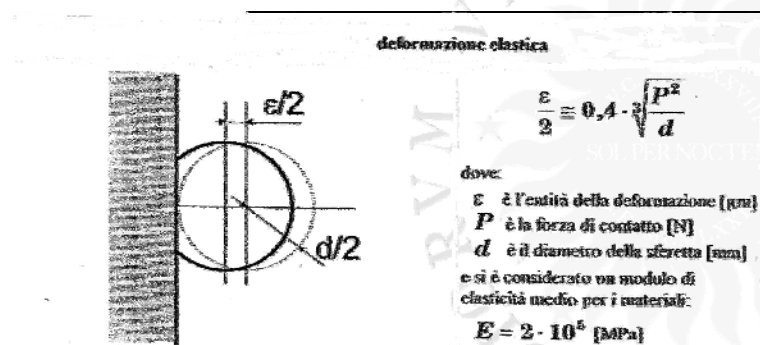
✚ L = distanza [mm]

Per esempio, un blocchetto di 250 mm dovrebbe contrarsi di 1,2 µm sotto una forza di fissaggio di 300 N.



L' Errore dovuto alle Deformazioni Elastiche

La forza di contatto esercitata durante la misura determina nel misurando una deformazione rappresentata dalla formula seguente: $\Delta L = L P / E S$, dove P =forza di contatto [N] - S = sezione del blocchetto [m²] - E = modulo di elasticità (m. di Young) del materiale [MPa] - L = distanza [mm]. Questo effetto su alcuni particolari materiali (basso modulo di Young) ed in presenza di forze di contatto non trascurabili determina errori sensibili



Deformazione del misurando a causa del suo peso

Un misurando posto orizzontalmente su due punti di appoggio, può curvarsi a causa del proprio peso.

Il grado di curvatura varia in base alla posizione e scelta dei punti di appoggio.

L'apparente contrazione del misurando (blocchetto pp) quando è sostenuto nei punti Airy viene data dalla formula seguente:

$$\Delta L = \frac{\rho \cdot g \cdot L^2}{2 \cdot E}$$

- ✚ ρ = densità del materiale [kg/m³]
- ✚ g =accelerazione di gravità [m/s²]
- ✚ E =modulo di elasticità longitudinale [N/m²]
- ✚ L =lunghezza totale del blocchetto

Questo effetto è più sensibile sui blocchetti lunghi (per alcune applicazioni sono utilizzati blocchetti pianoparalleli di lunghezza nominale 1 m).



L' Errore di Parallasse

Rappresenta la variazione dell'apparente allineamento fra due oggetti vicini ma non sovrapposti quando vengono visti da posizioni diverse ed è tipico degli strumenti a lettura analogica. Ad esempio, l'errore di parallasse:

- nel calibro con nonio è dovuto alla distanza tra la graduazione sul nonio e quella sulla scala
- nel comparatore è dovuto alla distanza tra l'indice di lettura ed il quadrante graduato
- nel micrometro è dovuto alla distanza fra la graduazione della superficie del tamburo e la linea di fede sulla bussola

L'errore di parallasse si quantifica attraverso la formula $\Delta L = h \cdot a / b$, dove h è la distanza tra il bordo graduato del nonio e la superficie graduata della scala principale, b è la distanza del punto di vista dell'operatore rispetto al punto privo di errori dovuti alla parallasse ed a è la distanza tra la scala graduata ed il punto di vista dell'operatore



Un esempio di bilancio di Incertezza per una taratura dimensionale

grandezza d'ingresso	$\bar{X}_i$	$u(x_i)$	tipo	$c_i = \frac{\partial}{\partial x_i}$	$u_i = c_i \cdot u(x_i)$
$M_{c,20}$	100,003 mm	0,03 μm	(A)	1	0,03 μm
$L_{s,20}$	4,985 mm	0,15 μm	(A)	1	0,15 μm
t_p	0,6 °C	0,1 °C	A	- 0,5 $\mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$	- 0,05 μm
t_s	0,3 °C	0,1 °C	A	1 $\mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$	0,1 μm
t_c	0,5 °C	0,1 °C	A	1 $\mu\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$	0,1 μm
α_p	5·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	0,3·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	B	- 0,6·10 ⁵ $\mu\text{m}^\circ\text{C}$	- 0,02 μm
α_s	10·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	0,3·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	B	0,3·10 ⁵ $\mu\text{m}^\circ\text{C}$	0,01 μm
α_c	10·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	0,3·10 ⁻⁶ °C ⁻¹	B	0,5·10 ⁵ $\mu\text{m}^\circ\text{C}$	0,02 μm
a	0	20 μm	B	4·10 ⁻³	0,08 μm
g	0	0,4·10 ⁻³	B	- 3·10 ² μm	- 0,12 μm
g'	0	0,4·10 ⁻³	B	3·10 ² μm	0,12 μm
g''	0	0,4·10 ⁻³	B	3·10 ² μm	0,12 μm
$\Delta\varepsilon_{c,p}$	0	0,03 μm	B	1	0,03 μm
$\Delta\phi^{z,m}$	0	=	B	1	=



Nel caso in tabella l'incertezza composta risulta:

$$u_c = \sqrt{\sum_i u_i^2} = \sqrt{\sum_i (c_i \cdot u_i)^2} = 0,4 \mu m$$

da cui, considerando un fattore di copertura 2 corrispondente ad un intervallo statistico di circa il 95% , si ricava l'incertezza estesa

$$U_e = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,4 = 0,8 \mu m$$



- Campioni di Riferimento nel settore Dimensionale



I Blocchetti Pianoparalleli



Esistono blocchetti pianoparalleli con diverse classi di precisione e di diversi materiali aventi differenti proprietà; i blocchetti pianoparalleli più utilizzati sono in *acciaio*, *ceramica* e *carburo di tungsteno*; alcune volte si usano blocchetti pianoparalleli in *zerodur* per avere variazioni trascurabili della lunghezza del campione al variare della temperatura.



Il blocchetto pianoparallelo è costruito in modo da soddisfare tolleranze molto restrittive relativamente alla distanza fra i centri delle superfici di misura, nonché alla planarità ed al parallelismo delle superfici di misura; non è invece utilizzabile come campione di perpendicolarità anche se la norma costruttiva (ISO 3650) definisce comunque un limite allo scostamento di perpendicolarità fra una superficie di misura ed un'altra superficie laterale.

Le facce di misura dei blocchetti pianoparalleli hanno superfici con grado di finitura tale da aderire alle facce di misura di altri blocchetti pianoparalleli (*adesione*) per formare delle combinazioni di blocchetti e realizzare campioni su vari punti di misura.

La migliore verifica della taratura dei blocchetti viene fatta con metodi interferometrici anche se ottime incertezze di taratura sono ottenibili eseguendo un confronto meccanico con altri blocchetti dello stesso valore nominale tramite comparatori o trasduttori induttivi.



Calibri ad anello e tampone

I calibri ad anello e tampone sono utilizzati come campioni di riferimento per la taratura di micrometri, macchine di misura, alesametri e calibri (misurazione del diametro interno).



Anelli di azzeramento

la misurazione viene effettuata lungo due direzioni fra loro ortogonali, poste sulla sezione mediana (direzione principale P e direzione secondaria S).

La direzione principale di misura è fisicamente evidenziata sull'anello mediante l'incisione di una linea retta nel piano ortogonale alla superficie cilindrica di misura;



Anelli Passa-Non Passa (P/NP)

la misurazione viene effettuata lungo due direzioni fra loro ortogonali ma il risultato della misurazione è calcolato sulla media dei valori riscontrati



Calibri ad anello: La normativa

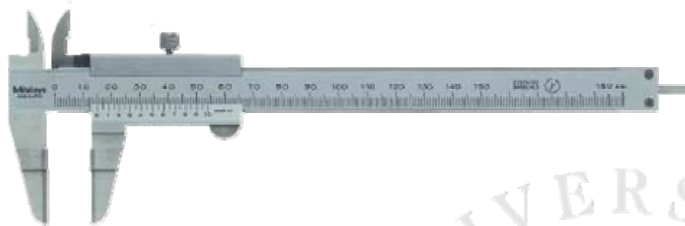
- | | |
|---------------------|--|
| <i>UNI 7366-1:</i> | Sistema ISO di tolleranze ed accoppiamenti. Verifica dei pezzi lisci. Direttive generali; |
| <i>UNI 7366-2:</i> | Sistema ISO di tolleranze ed accoppiamenti. Verifica dei pezzi lisci. Principi fondamentali per calibri e riscontri; |
| <i>UNI 7366-3:</i> | Sistema ISO di tolleranze ed accoppiamenti. Verifica dei pezzi lisci. Tolleranze di fabbricazione e logoramenti ammessi per calibri e riscontri; |
| <i>UNI 7366-4:</i> | Sistema ISO di tolleranze ed accoppiamenti. Verifica dei pezzi lisci. Segni distintivi, indicazioni e loro posizione su calibri e riscontri; |
| <i>UNI 10699-2:</i> | Istruzioni per il controllo delle apparecchiature per misurazioni dimensionali - Linee guida per calibri a tampone; |



- Strumentazioni di Misura nel Settore Dimensionale



Il calibro



Il calibro a corsoio è uno strumento per la misura di interni, esterni e profondità con campo di misura fino a oltre 1000 mm. Può essere digitale e analogico (a nonio o a comparatore).

La scala di misura nelle sue diverse funzioni (misurazioni di interni, esterni e profondità) solitamente è unica.

Non è adatto per misure di piccoli diametri (<4 mm) e per verificare tolleranze di pochi centesimi e nell'esecuzione di misure su pezzi in condizioni non statiche.

Nel processo di misura con calibro si raggiungono normalmente incertezze nell'ordine di 0,05 mm.

La verifica della taratura dei calibri viene eseguita di solito per confronto diretto con campioni di lavoro quali blocchetti pianparalleli e con l'utilizzo di calibri lisci ad anello per le misure di interni; sono utilizzabili anche altri sistemi di misura equivalenti (ad esempio macchine di misura mono o tridimensionali utilizzate come comparatori).



Calibri: Le normative applicabili

UNI 9313:	Procedura per la taratura dei calibri a corsoio;
UNI 9052:	Criteri base per le procedure di taratura dimensionale;
UNI 5384:	Calibri a corsoio normali tascabili;
UNI-ISO 3599:	Calibri a corsoio con nonio di 0,1 e 0,05 mm;
UNI-ISO 6906:	Calibri a corsoio con nonio di 0,02 mm;
UNI 10699-8:	Istruzioni per il controllo delle apparecchiature per misurazioni dimensionali - Linee guida per calibri a corsoio



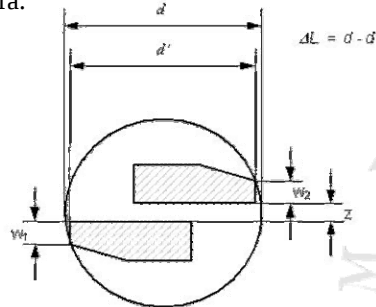
Problematiche di misurazione con il calibro

Nella misurazione di un pezzo con il calibro a corsoio possono intervenire numerosi fattori che contribuiscono all'incertezza di misura; fra questi:

- ✚ disallineamento del pezzo;
- ✚ deformazione elastica del pezzo da misurare e della superficie di misura del calibro per effetto della forza esercitata durante la misurazione;
- ✚ differenza fra la dilatazione termica dello strumento e quella del misurando nelle condizioni ambientali di misura;
- ✚ errore di lettura dovuto alla risoluzione e ripetibilità;
- ✚ errore di parallasse (per i calibri analogici);
- ✚ errore dovuto allo spessore dei becchi per le misure di interni;
- ✚ flessioni temporanee dell'asta graduata su due piani diversi (rilevanti su calibri con elevato campo di misura);
- ✚ errore di Abbe (dovuto al fatto che l'asse della scala di misura non coincide con l'asse del misurando e che le superfici dei becchi possono non essere perfettamente perpendicolari all'asse della scala)
- ✚ usura dei becchi di misura (errore sistematico)



Quando si misurano diametri interni inferiori a 10 mm, si commette un errore dovuto al fatto che lo spessore delle superfici di misura dei becchi per interni, per quanto piccolo, non consente di effettuare la misura del diametro del foro ma, anche con il miglior posizionamento, il calibro rileva la misura di una corda come è evidenziato in figura.



L'errore di misura (ΔL) dovuto alla curvatura della superficie interna del foro è funzione dello spessore dei becchi per interni (w_1 e w_2) e dell'intercapedine fra gli stessi (Z) secondo la relazione :

$$\Delta L = d - d' = d - \sqrt{d^2 - (w_1 + z + w_2)}$$



Il micrometro



consente misure di esterni, interni e profondità, per numerose applicazioni, con risoluzione fino ad $1 \mu\text{m}$ e precisione di misura che può raggiungere anche il valore di $0,005 \text{ mm}$ attraverso la misura dello spostamento di un'asta, filettata ad una estremità, movimentata dalla rotazione di una vite rispetto ad una madrevite fissa con il quale si riescono ad eseguire.

Il campo di misura della maggior parte dei micrometri ha un'ampiezza di 25 mm (è un limite costruttivo legato ad un corretto rapporto tra lunghezza e passo della vite) anche se esistono micrometri con fondo scala superiore a 1000 mm (con l'uso di opportune aste di azzeramento).



La normativa

<i>UNI 9191:</i>	Taratura di micrometri per esterni;
<i>UNI 9052:</i>	Criteri base per le procedure di taratura dimensionale;
<i>UNI 5708:</i>	Micrometri per esterni;
<i>UNI 10699-5:</i>	Istruzioni per il controllo delle apparecchiature per misurazioni dimensionali. – Linee guida per micrometri per misurazioni di profondità;
<i>UNI 10699-6:</i>	Istruzioni per il controllo delle apparecchiature per misurazioni dimensionali. – Linee guida per micrometri per esterni;
<i>ISO 361:</i>	Micrometer calipers for external measurement;
<i>DIN 863-1-2-3-4:</i>	Micrometers;
<i>JIS B 7502:</i>	Micrometer calipers for external measurement;
<i>ISO/DIS 9121:</i>	Geometrical Products Specification (GPS) - Dimensional measuring instruments: internal micrometers with two point contact – Design and metrological requirements;



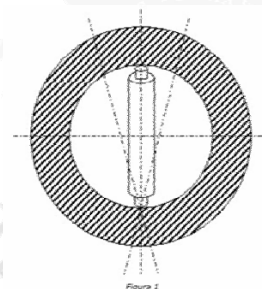
Problematiche di misurazione

Nella misurazione di un pezzo con il micrometro, oltre agli scostamenti rilevati in sede di taratura ed agli errori dovuti alla non perfetta geometria delle superfici di misura, possono intervenire altri fattori che contribuiscono all'incertezza di misura.

Fra questi sono da considerare:

- ✚ le deformazioni elastiche del pezzo dovute alla forza di misura;
- ✚ il posizionamento del micrometro (specialmente per diametri interni);
- ✚ la flessione del micrometro (specialmente per diametri interni).

Il posizionamento del micrometro è uno dei fattori più importanti per eseguire una misurazione accurata dei diametri interni.





Comparatori

Il comparatore è uno strumento costituito da un'asta vincolata a scorrere lungo una sola direzione la cui traslazione nella direzione dell'asse di misura viene rilevata da un principio di trasduzione che può essere meccanico, elettronico o optoelettronico e poi visualizzata sul quadrante dello strumento e/o inviata ad una unità di lettura tramite un'uscita digitale. Normalmente una misura con comparatore consente di raggiungere un'incertezza di circa 0,005 mm su un campo di 25 mm.

Il comparatore può avere diverse configurazioni in relazione agli specifici accessori ed alla punta tastatrice, la cui scelta è funzione della superficie di misura, della durezza del materiale e della specifica applicazione, tenendo conto che il contatto ideale si ha tra una superficie piana ed una superficie curva (due superfici piane o curve generano un maggiore errore di posizionamento).



Il comparatore si presta anche a misure in regime dinamico, purché con variazioni molto lente (profilo di ondulazione, parallelismo con una superficie di riferimento, centraggio o allineamento pezzi). Esistono comparatori a leva con corsa molto limitata (1 mm) e risoluzione millesimale, utilizzati di solito per controllare piccoli spostamenti rispetto ad una posizione di riferimento iniziale (azzeramento).



Comparatori: La normativa

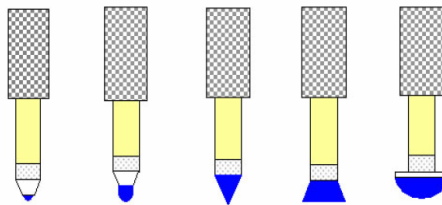
UNI 9954:	Taratura di comparatori, misuratori e trasduttori di spostamento ad asta scorrevole;
UNI 9052:	Criteri base per le procedure di taratura dimensionale;
UNI 10699-11:	Istruzioni per il controllo delle apparecchiature per misurazioni dimensionali. – Linee guida per comparatori ad asta;
UNI 4180:	Strumenti di misura – Comparatori centesimali a quadrante;
DIN 878:	Dial gauges;
ISO 463/R:	Dial gauges reading in 0,01 mm - 0,001 inch - 0,0001 inch;
DIN 2270:	Dial test indicators (lever type) for linear measurement;
DIN 879/1:	Dial indicator for linear measurement - With mechanical indication.
DIN 879/3:	Dial indicator for linear measurement - With mechanical indication and electrical limit contacts.



Comparatori: Problematiche di misura

La punta tastatrice del comparatore è una parte molto importante dello strumento. Nella scelta della punta tastatrice occorre tener presente che:

- ✚ il contatto fra la punta e la superficie del pezzo dovrebbe verificarsi idealmente in un solo punto;
- ✚ il contatto ideale si ha fra una superficie curva ed una superficie piana in quanto fra due superfici piane o fra due superfici curve si ha una peggiore ripetibilità di posizionamento;
- ✚ occorre eseguire un nuovo azzeramento dello strumento ogni volta che si cambia la punta tastatrice;
- ✚ il contatto fra punta e superficie di misura non deve deformare il pezzo;
- ✚ il punto di contatto dovrebbe stare sull'asse della punta tastatrice.



Truschini per altezze (altimetri)

L'altimetro o truschino è uno strumento costituito da una scala graduata verticale (fino a 1000 mm), solidale ad una base di appoggio e da un cursore mobile che scorre lungo la scala stessa idoneo per la misura di lunghezze lungo l'asse verticale (misuratore di altezze).

Viene anche utilizzato come utensile di precisione per la tracciatura. Alcuni modelli consentono uno spostamento della base di appoggio sul piano orizzontale che permette di rilevare la massima o la minima altezza di un profilo su un piano verticale; inoltre combinando la misurazione lungo l'asse Z con la misurazione lungo un'asse perpendicolare (eseguita con un comparatore montato al posto della punta tastatrice) si possono eseguire anche misure di conicità e di inclinazione.



La normativa

- UNI 10699-10:** Istruzioni per il controllo delle apparecchiature per misurazioni dimensionali. – Linee guida per calibri a corsoio per altezze (truschini per misurazioni);
- BS 1643:** Specification for precision vernier height gauges.



Problematiche di misurazione

Nella misurazione con l'altimetro, oltre agli scostamenti rilevati in sede di taratura ed agli errori dovuti alla non perfetta geometria delle superfici di misura, possono intervenire altri fattori che contribuiscono all'incertezza di misura; fra questi :

- ✚ disallineamento del pezzo;
- ✚ errore di perpendicolarità fra l'asse di misura dell'altimetro ed il piano della base di appoggio;
- ✚ deformazione elastica del pezzo da misurare per effetto della forza esercitata durante la misurazione;
- ✚ deformazione elastica del pezzo da misurare per effetto della forza peso;
- ✚ differenza fra la dilatazione termica dello strumento e quella del misurando nelle condizioni ambientali di misura (spesso non trascurabile a causa dell'elevato campo di misura);
- ✚ risoluzione e ripetibilità nelle condizioni di misura (compresa la ripetibilità di eventuali tastatori elettronici di tipo trigger e quella dovuta al posizionamento del pezzo e dello strumento);
- ✚ parallasse (per gli altimetri analogici).

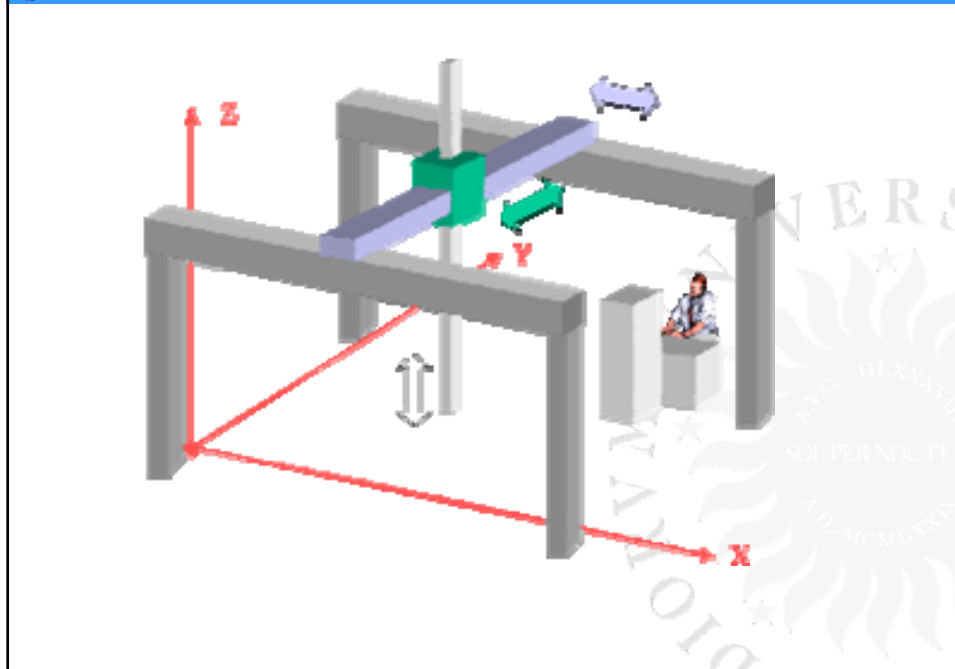


Metrologia a coordinate - Le CMM

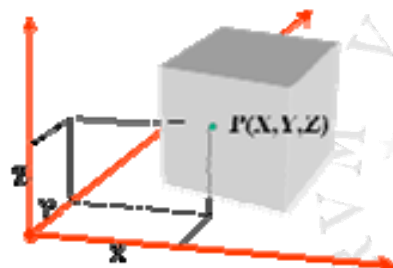
- sistema di riferimento, in genere a coordinate cartesiane ortogonali,
- struttura con tre assi mobili, ciascuno in una sola direzione perpendicolare alle altre due, con traiettoria perfettamente rettilinea.
- le posizioni relative delle parti mobili sono note al Sistema di Controllo, tramite trasduttori realizzati con reticoli di precisione incisi su vetro o acciaio dorato e sfruttando l'effetto fotoelettrico (righe ottiche).

Il movimento degli assi è assicurato in assenza di giochi ed attriti e con la massima rigidità (guide a sfere, pattini pneumostatici).

Il moto è trasmesso rigidamente ed in maniera tale da smorzare le vibrazioni indotte, quali viti a ricircolazione di sfere, cinghie, sistemi a frizione.



Ciascun punto degli oggetti disposti all'interno del volume utile della **CMM** è individuato da tre valori di coordinate. Queste sono rese note alla macchina “*tastando*” tali punti con un sensore in grado di “*comandare*” l'acquisizione della posizione dei carri mobili nel momento in cui il suo elemento sensibile entra in contatto con il pezzo.





Il sensore descritto è denominato "sistema tastatore", ed è costituito da un corpo e da uno stilo, che termina con l'elemento tastatore dello stilo, generalmente costituito da una sfera.



Esistono sensori in grado di acquisire i punti sul pezzo senza scostarsene, idonei a rilevare i profili secondo determinate traiettorie (scansione).

Altri sensori sono in grado di individuare le caratteristiche richieste senza entrare in contatto fisico con il pezzo, e operano con acquisizione ed elaborazione di immagini (tramite telecamere) o con scansione ottica per mezzo di raggi laser.



Occorre infine mettere in relazione le coordinate dei punti del pezzo misurato, e questo compito è svolto da un software di calcolo dei cosiddetti "elementi geometrici associati (a coordinate di punti)". Altro software sarà utilizzato per compensare gli errori sistematici ed applicare le costanti di sistema, altro ancora sarà delegato a interfacciare l'operatore ed a gestire i dati in ingresso ed in uscita.

Foglio di Output					
elemento	valore nominale	valore misurato	errore	toleranza	OOT
#1	20,000	20,002	0,002	0,005	X
#2	200,000	200,005	0,005	0,008	X
#3	70,000	69,998	0,002	0,005	X
#100	0,005	0,008	0,003	0,002	X



Avendo note le coordinate di punti in un sistema di riferimento, è possibile stabilire relazioni tra gli stessi.

Ad esempio, dati due punti P1 e P2, individuati rispettivamente dalle coordinate (X1,Y1,Z1) e (X2,Y2,Z2) sarà possibile calcolare la distanza tra i due:

$$D = \sqrt{(X2 - X1)^2 + (Y2 - Y1)^2 + (Z2 - Z1)^2}$$



Algoritmi di maggiore complessità sono in grado di descrivere matematicamente gli elementi geometrici passanti per punti individuati da coordinate in un sistema di riferimento.

Rette, piani, circonferenze, cilindri e coni nello spazio costituiscono i cosiddetti "elementi geometrici associati fondamentali", con cui si possono "costruire" tutti gli oggetti solidi privi di superfici curve.

Il software di calcolo delle CMM descrive matematicamente tali elementi e loro relazioni (intersezioni, distanze, etc) .

Tali elementi sono descritti matematicamente con la massima precisione per mezzo di un numero di punti ben definito: la retta, per due punti; il piano, per tre punti; il cilindro, per cinque punti.



Nella pratica della metrologia a coordinate sarà necessario utilizzare punti in numero maggiore ("nuvola di punti"), e di conseguenza il software dovrà calcolare gli elementi che meglio si adattano ai vincoli costituiti dai punti reali individuati.

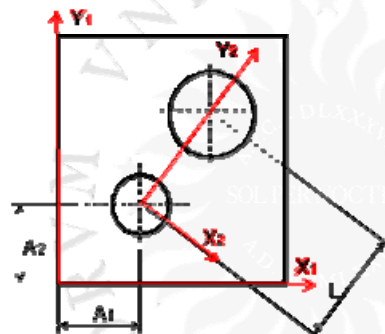
Tra le possibili soluzioni al problema, spesso si sceglie di utilizzare "algoritmi ai minimi quadrati", definendo come criterio di ottimizzazione quello per cui la somma dei quadrati delle distanze dei punti reali dall'elemento calcolato è minima.

E' ovvio quindi che l'elemento calcolato e utilizzato non passerà per i punti originari, ma sarà invece costituito da una interpolazione tra gli stessi, detta appunto "dei minimi quadrati".



Una delle più interessanti possibilità offerte dalle CMM è quella di potere individuare sistemi di riferimento personalizzati (coordinate pezzo), sulla base dei quali determinare le caratteristiche dimensionali e geometriche del pezzo, essendo comunque le informazioni interconnesse tramite il sistema di riferimento principale della macchina, e senza necessità di effettuare operazioni supplementari di acquisizione dati.

Nel caso rappresentato in figura, le dimensioni A_1 ed A_2 sono riferite al sistema X_1, Y_1 , mentre la distanza centro-centro L è riferita al sistema X_2, Y_2 . Entrambi i sistemi di riferimento sono costruiti sulle stesse acquisizioni di punti, al contorno e sulle circonferenze, necessarie comunque per ottenere il risultato.





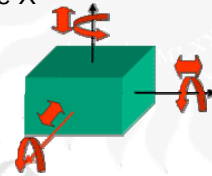
Contributi d'incertezza

Una delle cause d'incertezza delle misure prodotte dalle CMM è la presenza di deviazioni degli equipaggi mobili dalla direzione ideale e dall'assetto originale; tali deviazioni si manifestano per ciascuno di essi, in numero di 6, e precisamente tre lineari e tre angolari, per ciascuna direzione del moto.

Quindi in totale gli "errori geometrici" saranno 3 (per i tre assi) $\times 6$ (gli errori per ciascun asse) $= 18$, a cui aggiungere gli errori di deviazione dalla perpendicolarità per ciascuna coppia di assi, 3 in totale.

Nella figura sono rappresentati i sei errori del carro mobile lungo, ad esempio, l'asse X:

- deviazione dalla pos. ideale su X, al moto in direzione X
- deviazione dalla pos. ideale su Y, al moto in direzione X
- deviazione dalla pos. ideale su Z, al moto in direzione X
- rotazione attorno ad X, al moto su X
- rotazione attorno ad Y, al moto su X
- rotazione attorno a Z, al moto su X



Un secondo contributo d'incertezza proviene dal sistema tastatore, per presenza di flessioni ed isteresi meccaniche non omogenee in tutte le possibili direzioni di tastatura.

La presenza di questi errori è visibile misurando una sfera per numerosi punti, e valutando i valori dei raggi polari: si osserverà come essi non siano costanti in tutte le direzioni, e neppure siano confermate le stesse misure in seguito a ripetizioni del ciclo di misurazione.

Contribuiscono ancora all'incertezza i fattori esterni (grandezze di influenza), e principalmente la temperatura (differenza dal valore convenzionale di $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e le differenze di temperatura tra pezzo e scale della CMM).

Ancora, le stratificazioni di temperatura ambientale, sia in direzione orizzontale sia in verticale (i volumi di misura sono generalmente grandi), i fenomeni convettivi e l'irraggiamento termico comportano dilatazioni e deformazioni strutturali che agiscono introducendo errori di geometria supplementari.



Possiamo quindi immaginare che ciascun punto tastato su un particolare reale, e di cui viene indicata la posizione tramite le coordinate X,Y,Z nel sistema di riferimento prescelto, possa in realtà trovarsi in una sfera il cui centro è applicato nelle stesse coordinate determinate, ed il cui raggio varia in funzione dell'entità dei citati contributi d'incertezza.

Gli elementi geometrici ideali calcolati dalla CMM saranno quindi determinati con una variabilità funzione dell'incertezza associata alla posizione di ciascun punto tastato. Ed il risultato della misurazione sarà quindi influenzato dalle "accortezze" dell'Operatore in sede di costruzione del programma di misurazione.

Saranno quindi fondamentali le scelte circa il numero e la distribuzione dei punti, la velocità e l'accelerazione della macchina, la configurazione del sistema tastatore, la forza di contatto.