

White paper

Guida alla scelta degli stili per macchine di misura

Nella scelta del modo ottimale per misurare un componente su una macchina di misura a coordinate (CMM) molte decisioni sono prese in modo automatico, perché fanno parte di una routine ormai consolidata nel tempo. Le specifiche di accuratezza della CMM, il tipo di sensore da utilizzare (a contatto o di scansione) e il metodo ottimale di ispezione sono spesso dati per scontati. Tuttavia, queste impostazioni fondamentali per un buon risultato metrologico possono essere vanificate dall'utilizzo di uno stilo inadatto che potrebbe compromettere l'accuratezza delle misure.



Quando si definisce l'accuratezza di una misura con CMM, si tende a inserire un margine di tolleranza con un rapporto minimo di 1:5 (1:10 sarebbe ideale, ma in molti casi risulta troppo costoso per essere praticabile). Questo rapporto garantisce un margine di sicurezza per assicurare che i risultati abbiano un livello di incertezza relativamente basso rispetto all'intervallo di variazione previsto per il pezzo. Finché è possibile mantenere il rapporto di 1:5 sulle tolleranze più strette, non dovrebbero nascere problemi di accuratezza.

Purtroppo, a volte è sufficiente una piccola modifica, quale la sostituzione di uno stilo della sonda, per causare variazioni significative nei risultati di una misura. Non è sufficiente affidarsi alla calibrazione annuale della CMM, perché questa consente solo di confermare i risultati ottenuti con lo stilo di prova (in genere si tratta di uno stilo molto corto).



Le specifiche e la configurazione dello stilo possono incidere sulla precisione dei risultati

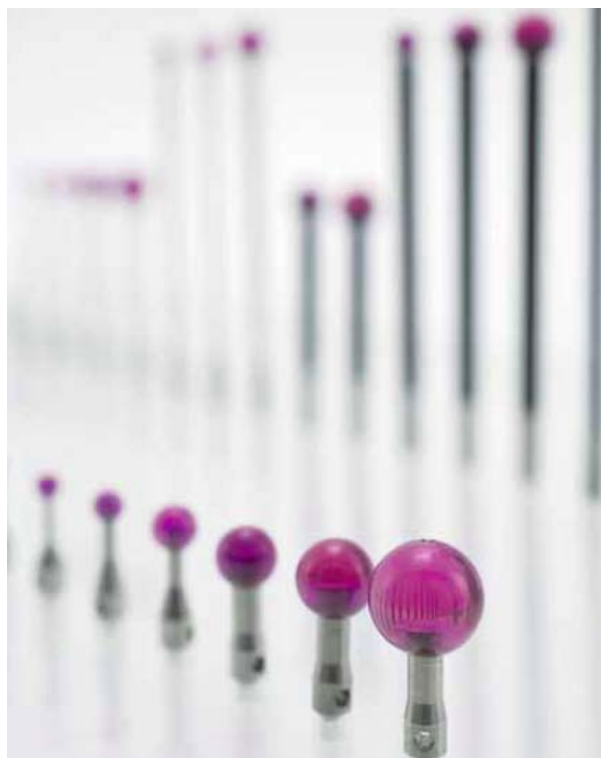
Le condizioni del test sono quelle ottimali, ma non sempre rispecchiano la realtà. Per ottenere un quadro più preciso, è necessario capire in che percentuale lo stilo contribuisca all'incertezza delle misure.

In questo articolo saranno presi in esame i quattro aspetti della scelta dello stilo che incidono maggiormente sull'accuratezza generale della CMM:

1. Sfericità (rotondità) della sfera dello stilo
2. Deflessione dello stilo
3. Stabilità termica
4. Materiale della punta dello stilo (applicazioni di scansione)

1. Sfericità (rotondità) della sfera dello stilo

Nella maggior parte degli stili la punta è una sfera di rubino sintetico. Un eventuale errore nella sfericità (rotondità) delle punte può causare incertezza nelle misure della CMM e una perdita di accuratezza che può arrivare anche al 10%.



Punte sferiche in rubino

Le sfere di rubino hanno vari livelli di precisione, definiti "gradi", che indicano la deviazione massima rispetto a una sfera perfetta. Le due specifiche più comuni sono il grado 5 e il grado 10 (a un grado basso corrisponde una maggiore sfericità). Una riduzione del grado da 5 a 10 consente un piccolo risparmio nei costi dello stilo, ma potrebbe essere sufficiente per mettere a

rischio il rapporto 1:5. Il problema sta nel fatto che è impossibile capire a occhio nudo il grado di sfericità e anche i risultati delle misure non servono a evidenziarlo, quindi diventa difficile valutare l'impatto di tale fattore. Una soluzione consiste nello specificare il grado 5 come standard: queste punte sono leggermente più costose, ma l'investimento viene sicuramente ripagato dalla riduzione degli scarti e, soprattutto, dall'eliminazione del rischio di approvare un pezzo non conforme alle specifiche. Può sembrare strano, ma quanto più accurata è la macchina CMM, tanto maggiore sarà l'impatto del grado della sfera. Nelle CMM con specifiche elevate il grado di sfericità può ridurre l'accuratezza anche del 10%. Di seguito viene fornito un esempio...

Un tipico errore di ispezione, in base a ISO 10360-2 (MPE_P), definito utilizzando uno stilo con sfera di grado 5:

- **$MPE_P = 1,70 \mu\text{m}$**

Questo valore viene determinato misurando 25 punti discreti, ciascuno valutato come 25 raggi separati. L'intervallo di variazione dei raggi costituisce il valore MPE_P . La rotondità della sfera dello stilo contribuisce direttamente a tale valore e pertanto il passaggio da un grado 5 a un grado 10 accresce il valore di $0,12 \mu\text{m}$ e aumenta l'errore di ispezione del 7%:

- **$MPE_P = 1,82 \mu\text{m}$**

La rotondità della sfera incide su MPE_{THP} , che utilizza quattro percorsi di scansione su di una sfera per valutare le prestazioni della sonda di scansione.

Note:

- Sfera di grado 5 = $0,13 \mu\text{m}$
- Sfera di grado 10 = $0,25 \mu\text{m}$

Per le applicazioni più esigenti, Renishaw offre una serie di stili con sfere di grado 3 ovvero con una sfericità di appena $0,08 \mu\text{m}$.

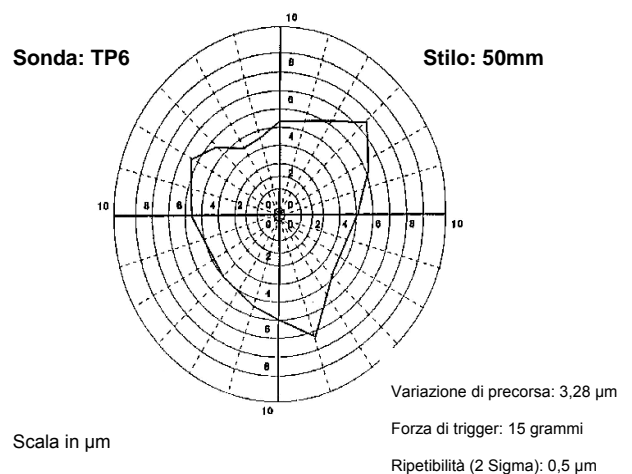


2. Deflessione dello stilo

Quando si utilizzano sonde a contatto, come ad esempio la diffusissima TP20, è prassi comune cambiare modulo per sfruttare al meglio i vari stili, dato che ciascuno è ottimizzato per un particolare tipo di misura. La ragione per cui non si adotta sempre uno stilo lungo è che all'aumentare della lunghezza corrisponde una riduzione dell'accuratezza. Si consiglia sempre di utilizzare stili quanto più corti e rigidi possibili, ma da dove viene questo criterio?

Anche se lo stilo non è direttamente responsabile di questo particolare errore, la sua lunghezza contribuisce ad amplificarlo. L'errore ha origine dalla forza variabile richiesta per attivare la sonda nelle varie direzioni. Nella maggior parte dei casi, le sonde non si attivano nel momento preciso del contatto fra lo stilo e il componente, ma richiedono che venga esercitata una forza superiore a quella della molla presente all'interno del meccanismo del sensore. Tale forza produce una deformazione elastica dello stilo. La deflessione consente un breve spostamento della sonda in relazione al pezzo, che ha luogo dopo il contatto e prima dell'attivazione. Tale spostamento viene detto *precorsa*.

La disposizione cinematica triangolare di gran parte delle sonde richiede forze differenti per generare l'attivazione. Nelle direzioni di maggiore rigidità la sonda resisterà all'attivazione fino a quando non si ottiene un'elevata deflessione dello stilo. Ciò significa anche che la CMM esegue uno spostamento maggiore e di conseguenza la precorsa varierà in base all'angolo di approccio (vedere lo schema di seguito). La variazione di precorsa risulta ancora più complessa quando si utilizzano angoli di approccio composti (assi X, Y e Z).



Angolo di approccio e precorsa necessari per attivare una sonda a contatto TP6

Per ridurre al minimo tale effetto, tutti gli stili sono calibrati prima dell'utilizzo, mediante una sfera di riferimento di dimensioni note. In un mondo perfetto, tale processo consentirebbe di mappare gli errori con tutte le combinazioni di stili e angoli di approccio. In realtà, per risparmiare tempo si utilizza spesso un campione di angoli e si adottano alcune medie, lasciando quindi la possibilità che alcuni errori permangano.

È difficile calcolare l'effetto di tale pratica sull'incertezza delle misure, a meno di non eseguire una serie di test empirici. Il fattore chiave da tenere in considerazione è che tutti gli errori residui di variazione di precorsa sono amplificati dalla flessibilità dello stilo selezionato. Questo elemento sottolinea l'importanza dei materiali scelti per lo stilo: è indispensabile trovare un buon compromesso fra la rigidità dello stelo e altre caratteristiche, quali il peso e il costo. Se l'acciaio (con modulo di Young pari a $E = 210 \text{ kN/mm}^2$) è un materiale adatto per molti stili corti, il materiale più rigido che si utilizza comunemente è il carburo di tungsteno ($E = 620 \text{ kN/mm}^2$), ma la sua elevata densità non lo rende adatto agli stili lunghi. In questi casi, la fibra di carbonio rappresenta un'eccellente compromesso fra rigidità ($E \geq 450 \text{ kN/mm}^2$) e peso. Grazie alla loro leggerezza e alla stabilità termica, gli stili in ceramica ($E = 300 - 400 \text{ kN/mm}^2$) sono spesso utilizzati nelle applicazioni di ispezione su macchine utensili.



Stili lunghi e prolunghie sono spesso costruiti in fibra di carbonio, che garantisce rigidità e leggerezza

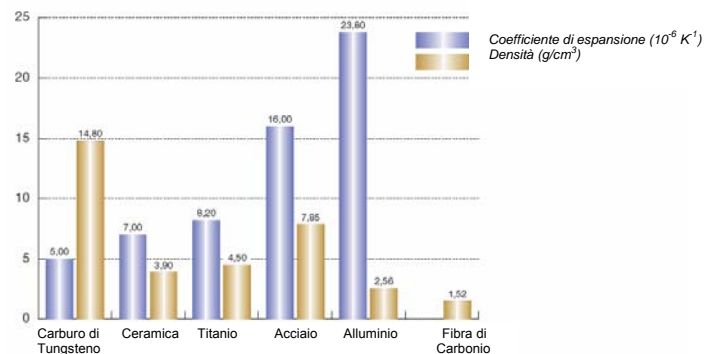
La rigidità dello stilo dipende anche dai giunti che lo compongono. Come regola generale, si consiglia di evitare per quanto possibile i giunti, perché possono introdurre isteresi. In alcune situazioni però i giunti sono indispensabili, ad esempio quando si utilizza un sensore fisso per misurare pezzi complessi. In questi casi, potrebbe essere inevitabile ricorrere a una serie di stili, prolunghie e connettori. Ancora una volta, è necessario prestare grande attenzione ai materiali scelti per ciascun elemento, perché il loro impatto sulla rigidità, sul peso e sulla stabilità della configurazione può essere significativo.



Nel caso di configurazioni complesse è necessario che i materiali siano scelti con estrema cura, per non ridurre il livello di precisione.

3. Stabilità termica

Le fluttuazioni termiche possono provocare errori di misura anche significativi. La scelta del materiale corretto per le prolunghie dello stilo può garantire maggiore stabilità in condizioni variabili e, di conseguenza, risultati di misura più uniformi. I materiali con un basso coefficiente di espansione termica sono da preferire, soprattutto se si utilizzano stili lunghi, perché l'allungamento termico dipende dalla lunghezza:



Coefficienti di espansione termica relativa e densità dei materiali degli stili

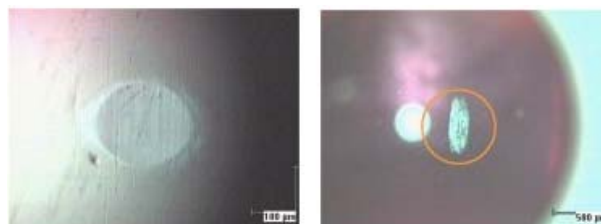
Come indicato in precedenza, la fibra di carbonio è il materiale più comune per stili lunghi e prolunghe, perché è rigido, leggero e la sua lunghezza non cambia con il variare della temperatura. Per i componenti metallici, come i giunti, il titanio fornisce la migliore combinazione di resistenza, stabilità e densità. Renishaw produce sonde e prolunghe in entrambi i materiali.

4. Selezione del materiale della sfera

Per la maggior parte delle applicazioni, le sfere in rubino rappresentano la scelta standard per le punte degli stili. In qualche caso altri materiali possono costituire un'alternativa migliore.

Con le misure a contatto, la punta dello stilo tocca la superficie solo per brevi periodi e non vi sono spostamenti relativi. La scansione è diversa, perché la sfera scivola sulla superficie del componente e subisce un'usura da attrito. In circostanze estreme il contatto prolungato può consumare la sfera o provocare il deposito di materiali con una conseguente riduzione della sfericità. Tali effetti sono amplificati se una singola area della sfera resta in costante contatto con la superficie. Renishaw ha condotto ricerche approfondite che hanno portato alla luce due differenti tipi di usura:

- **Usura per abrasione:** si ha durante la scansione di superfici (ad esempio la ghisa) le cui particelle di residui causano piccolissimi graffi sullo stilo e sul pezzo. Ciò provoca un leggero appiattimento della punta dello stilo. Le punte in ossido di zirconio sono particolarmente resistenti e rappresentano la scelta ideale per queste applicazioni.
- **Usura per adesione:** risulta quando esiste un'affinità chimica fra la sfera dello stilo e il materiale del componente, come nel caso delle sfere in rubino (ossido di alluminio) che scansionano pezzi in alluminio. In tale caso, il materiale passa dal componente relativamente morbido allo stilo, creando sulla punta una patina di alluminio che ne riduce la rotondità. In queste circostanze si consiglia di ricorrere a punte in nitrato di silicio che ha una buona resistenza all'usura e non attrae l'alluminio.



Usura per abrasione (sinistra): il materiale è asportato dalla punta dello stilo. Usura per adesione (destra): il materiale è depositato sulla sfera dello stilo.

5. Altri fattori

Ulteriori considerazioni per la scelta dello stilo:

- La filettatura dello stilo deve combaciare con quella del sensore
- Tipo di stilo – dritto, a stella, orientabile o con configurazione personalizzata
- Tipo di punta – a sfera, a cilindro, a disco, semisferica
- Dimensioni della punta per ridurre al minimo l'impatto della rugosità della superficie sull'accuratezza delle misure

Questi argomenti sono trattati in maniera dettagliata nella brochure Renishaw dedicata agli stili di precisione (documento H-1000-3304) scaricabile dal sito Web www.renishaw.it/styli



Conclusione

Gli stili sono un elemento chiave in qualsiasi operazione di misura, perché costituiscono l'interfaccia fra il sensore e il componente. Consentono di accedere ai vari elementi del pezzo e devono fornire alla sonda indicazioni fedeli sulla posizione della superficie. Per una buona accuratezza delle ispezioni, è necessario che gli stili siano costruiti con componenti di precisione, ciascuno dei quali deve essere costruito con i materiali più adatti al tipo di misura da eseguire. Uno stilo selezionato con cura non contribuirà ad aggiungere incertezza alle misure e produrrà risultati affidabili e costanti. Quando le tolleranze sono strette e sono necessari stili lunghi, l'impatto della configurazione di misura sull'accuratezza va tenuto bene in conto.

Per ulteriori informazioni, visitare il sito Web www.renishaw.it/styli