



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Sperimentazione della metodologia “multiple  
measurement strategies” per la validazione pre-normativa  
della ISO-DTS 15530-2**

Relatore: Enrico Savio

Co-relatore: Marco Menoncin

Laureando: Enrico Lancerin

Matricola: 1197718

Anno Accademico 2019/2020.



# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1:</b>	
<b>Incertezza di misura nelle macchine di misura a coordinate CMM .....</b>	<b>4</b>
1.1 Incertezza nelle misure a coordinate.....	4
1.2 ISO GUM.....	8
1.2.1 ISO 14253-2, approccio PUMA.....	10
1.2.2 Giudizio di esperti .....	11
1.2.3 ISO 15530 .....	12
1.3 Prove di accettazione e verifica periodica per macchine di misura a coordinate (CMM) .....	12
1.3.1 Verifica delle prestazioni delle CMM in modalità di scansione a contatto .....	14
1.3.2 Verifica delle prestazioni per CMM nei sistemi di tastatura a contatto .....	16
1.3.3 Verifica delle prestazioni delle CMM per misurazioni dimensionali .....	17
<b>Capitolo 2:</b>	
<b>La serie ISO 15530: Metodi per la valutazione dell'incertezza per macchine di misura a coordinate (CMM) in ambito industriale .....</b>	<b>20</b>
2.1 ISO 15530 parte 1: descrizione e terminologia .....	21
2.2 ISO 15530 parte 3: Valutazione dell'incertezza tramite l'utilizzo di pezzi tarati o campioni di misura.....	21
2.2.1 Requisiti: condizioni operative.....	23
2.2.2 Valutazione dell'incertezza con pezzi tarati .....	24
2.3 ISO 15530-4: Valutazione dell'incertezza di misura mediante l'utilizzo della simulazione al computer .....	28
2.3.1 Il software di valutazione dell'incertezza (UES).....	29

2.3.2 Test di prova del software di valutazione dell'incertezza (UES) .....	31
2.3.2.1 Test fisici su una singola CMM .....	31
2.3.2.2 Verifica e valutazione assistita al calcolatore .....	32
2.3.2.3 Confronto con risultati di riferimento specifici .....	33
2.3.2.4 Indagini statistiche a lungo termine .....	34
2.4 Considerazioni sulla difficoltà di applicazione della serie ISO 15530 .....	35

### Capitolo 3:

<b>Studio della metodologia “multiple measurement strategies” per applicazioni industriali</b> .....	<b>37</b>
3.1 ISO 15530-2: Tecnica delle mutiple measurement strategies .....	37
3.2 Il progetto EUCoM .....	39
3.2.1 Work Package 1: metodi a posteriori (tipo A) .....	40
3.2.2 Work Package 3: validazione sperimentale dei metodi .....	41
3.3 Procedura per la valutazione dell'incertezza di misura sviluppata nel progetto EUCoM ...	42
3.3.1 Misurazioni multiple sul pezzo in esame .....	43
3.3.2 Misure su un campione di lunghezza.....	45
3.3.3 Misure per la verifica del tastatore .....	47
3.3.4 Valutazione dell'incertezza di misura .....	49
3.3.5 Calcolo dei contributi di incertezza tipo .....	51
3.3.5.1 Valutazione dei contributi $u_{rep}, u_{geo}$ .....	51
3.3.5.2 Valutazione del contributo $u_L$ .....	53
3.3.5.3 Valutazione del contributo $u_D$ .....	58
3.3.5.4 Valutazione del contributo $u_{PrbLoc}$ .....	61
3.3.5.5 Valutazione del contributo $u_{geo*dist}$ .....	62

3.3.5.6 Valutazione del contributo $u_{temp}$ .....	64
---	----

#### **Capitolo 4:**

<b>Sperimentazione del metodo “multiple measurement strategies” .....</b>	<b>67</b>
4.1 Primo campione: Connecting Rod.....	72
4.1.2 Allineamento .....	74
4.1.3 Verifica dei tastatori.....	75
4.1.4 Misurazioni su campione di lunghezza.....	79
4.1.5 Misurazioni effettuate sul primo campione .....	83
4.2 Secondo campione: Multi Feature Check (MFC).....	85
4.2.1 Allineamento.....	86
4.2.2 Verifica dei tastatori.....	87
4.2.3 Misurazioni su campione di lunghezza .....	88
4.2.4 Misurazioni effettuate sul secondo campione .....	89
4.3 Terzo campione: Hyperbolic Paraboloid (HP) .....	91
4.3.2 Allineamento .....	94
4.3.3 Misurazioni effettuate sul terzo campione .....	94

#### **Capitolo 5:**

<b>Risultati della sperimentazione.....</b>	<b>97</b>
5.1 Connecting rod: Analisi di ripetibilità dei risultati sperimentali .....	97
5.1.2 Confronto dei risultati sperimentali .....	100
5.1.3 Valutazione dell’effetto della temperatura come contributo d’incertezza $u_{temp}$ .....	102
5.2 Multi Feature Check: Analisi di ripetibilità dei risultati sperimentali .....	106
5.2.2 Confronto dei risultati sperimentali .....	111

5.2.3 Valutazione dell'effetto della temperatura come contributo d'incertezza $u_{temp}$ .....	115
5.3 Hyperbolic Paraboloid: Analisi dei risultati sperimentali .....	116
5.3.1 Analisi dei risultati sperimentali in scansione lungo delle traiettorie .....	118

## **Capitolo 6:**

<b>Considerazioni finali</b> .....	<b>120</b>
6.1 Considerazioni sull'effetto della temperatura .....	121
6.2 Considerazioni sull'effetto della velocità di scansione .....	121

# Introduzione

Lo scopo di questa di tesi consiste nel contribuire alla validazione sperimentale di una nuova procedura per la valutazione dell'incertezza di misura per macchine di misura a coordinate (CMM), da poter applicare in maniera più semplificata in ambito industriale in modo da ridurre tempi e costi di questo processo.

La macchina di misura a coordinate è uno strumento che permette di acquisire le coordinate spaziali appartenenti alle superfici di un manufatto. Questa macchina può essere controllata manualmente da un operatore, o per mezzo di un computer. Il sistema di movimentazione di una CMM è tipicamente costituito da tre assi, X, Y e Z. Questi assi sono tra loro ortogonali e formano un sistema di coordinate tridimensionale. Le misure sono definite attraverso un tastatore (probe). Il processo più comune per l'acquisizione è a contatto (meccanico), ma ne esistono anche di tipo ottico, laser o mediante la luce strutturata.

Una macchina di misura a coordinate è tipicamente formata dai seguenti dispositivi:

- una struttura principale, che tipicamente consiste in una struttura di granito ed un banco di lavoro;
- un sensore per la misura, chiamato probe;
- un sistema elettronico per il controllo e l'elaborazione dei dati.

Le tipologie di misura di una macchina di misura a coordinate sono:

- punto-punto: si rileva un punto alla volta, ed il sensore si stacca dalla superficie dopo ogni rilevazione. Lo svantaggio di questo metodo è che può essere un procedimento molto lento per la rilevazione di ogni punto;
- scansione: il sensore è sempre a contatto con la superficie e la misura avviene in continuo, è una procedura che permette di acquisire i punti più velocemente rispetto alla modalità precedente, ma è anche meno accurata. Attraverso questa tipologia di misura si possono anche scansionare superfici con geometria incognita.

Esistono diversi settori in cui le CMM sono utilizzate come ad esempio l'industria automobilistica, meccanica, elettronica ed aeronautica e militare. Per permettere la buona riuscita dell'operazione di acquisizione della nuvola di punti la struttura meccanica di una macchina di misura a coordinate deve possedere alcune proprietà:

- rigidità statica e dinamica della struttura;
- accessibilità a tutte le parti del pezzo da misurare;
- facilità di manovra;

- facilità nell'esecuzione dell'operazione di carico/scarico del pezzo.

Le macchine di misura a coordinate sono quindi uno dei più importanti e diffusi strumenti di misura per le misurazioni di componenti meccanici in ambito industriale, grazie alla loro elevata precisione e versatilità, consentendo la misurazione automatica di migliaia di punti nello spazio con grande accuratezza anche su superfici complesse. Nonostante questo, però, presentano delle difficoltà nel valutare l'incertezza di misura associata ai risultati a causa di **numerose** fonti di errore legate al complesso funzionamento del sistema.

Impiegare tempo e risorse in questi studi deve far comprendere l'importanza fondamentale che ha la valutazione dell'incertezza di misura, tuttavia è spesso trascurata nei processi di misurazione. La valutazione degli investimenti utilizzando la funzione di costo totale non permette di evidenziare il valore aggiunto fornito dal processo di valutazione dell'incertezza. Il valore aggiunto è legato all'impatto economico dei benefici della metrologia e si basa sulla quantificazione dei risparmi derivanti dalla riduzione dei costi dovuti alla produzione inefficiente. Infatti, non conoscere il valore dell'incertezza di misura significa avere dati meno affidabili su cui basare eventuali scelte nel processo produttivo: produrre pezzi che si riveleranno difettosi o scartarne altri che sarebbero stati invece idonei. Quindi nell'ottica della valutazione delle conformità e non conformità, ciò che viene fatto da molte aziende per aggirare tale difficoltà è ridurre l'intervallo di tolleranza delle specifiche geometriche dei prodotti, cioè i limiti di variabilità entro i quali i componenti assicurano il loro corretto funzionamento; questo garantisce sia la funzionalità che la riduzione del rischio di produrre pezzi difettosi, ma comporta lavorazioni più lunghe e costose.

Essere in grado di assegnare un valore corretto all'incertezza di misura consente invece un maggiore controllo dei processi produttivi, ottimizzando l'impiego di tempo e risorse; infatti, nella maggior parte delle industrie avanzate i costi legati alle misurazioni rappresentano una discreta parte, in quanto buone misurazioni possono aumentare significativamente il valore, l'efficacia e la qualità di un prodotto.

Una nuova metodologia, proposta all'interno del progetto europeo EUCoM (Evaluating Uncertainty in Coordinate Measurement), pone alla base la tecnica delle multiple measurement strategies, la quale prevede la misura con una CMM di un pezzo attraverso distribuzioni multiple di punti tastati in diverse orientazioni del pezzo rispetto agli assi della macchina. Questo approccio suggerisce di ripetere una misurazione variandone le condizioni così da poter assumere una ragionevole indipendenza delle misurazioni; permettendo di randomizzare per quanto possibile gli errori sistematici sconosciuti, in modo da poter applicare una media e una valutazione dell'incertezza basata sulla varianza dei risultati.

Questo approccio è efficace in una corretta valutazione dell'incertezza di misura in quanto nella maggior parte dei casi, l'incertezza di misura nella metrologia a coordinate è dominata da errori sistematici sconosciuti che non possono essere determinati, dunque corretti, con misurazioni ripetute del pezzo in un'unica posizione ed utilizzando la stessa strategia di tastatura.

Questa procedura in realtà non rappresenta un argomento nuovo in metrologia e negli anni è stata oggetto di vari studi e sperimentazioni per validarne i metodi e riuscire ad ampliare la serie di normative ISO 15530 con la parte 2. L'obiettivo alla base dell'introduzione della ISO DTS 15530-2 è quello di aiutare la produzione industriale a mantenere un alto livello di qualità e competitiva sul mercato mondiale grazie a misurazioni che tengano conto dell'incertezza di misura, valutata correttamente ma in maniera semplificata rispetto alle procedure descritte nelle norme vigenti (ISO 15530-3; ISO 15530-4).

# Capitolo 1

## Incertezza di misura nelle macchine di misura a coordinate CMM

### 1.1 Incertezza nelle misure a coordinate

Qualità e misurazione sono due termini strettamente correlati che interagiscono nei processi di organizzazione industriale. Test, misurazioni e le successive analisi sono realizzate per verificare la conformità del prodotto in base alle specifiche, per il quale deve essere garantito il raggiungimento dei requisiti del prodotto.

La serie di norme ISO 9000 mira a definire i requisiti dei sistemi di gestione della qualità per un'organizzazione disposta a dimostrare la propria capacità di fornire regolarmente prodotti al fine di soddisfare le esigenze del cliente e aumentarne la soddisfazione attraverso il proprio sistema di qualità.

La valutazione dell'incertezza è importante ed è obbligatoria se la società vuole raggiungere i requisiti stabiliti negli standard di qualità, per cui ogni processo di misurazione richiede una valutazione dell'incertezza.

Ogni elemento di una CMM infatti può influenzare il risultato di misura e di conseguenza la relativa incertezza; diventa perciò necessario che ogni elemento sia controllato e verificato per essere in grado di fornire informazioni corrette sull'intero sistema della CMM.

L'incertezza nei sistemi di misurazione delle coordinate (CMS) proviene da molte fonti. Stimare l'incertezza totale è, tuttavia, difficile, a causa del fatto che i sistemi di misurazione a coordinate sono strumenti di misurazione multiuso le cui incertezze variano a seconda del compito da svolgere, dell'ambiente, dell'operatore, delle metodologie di misurazione scelte, ecc.

Possibili fonti di incertezza, riportate in figura 1.1, potrebbero essere legate a:

- errori geometrici della macchina variabili in funzione della posizione ed orientazione del misurando nel volume di misura della CMM
- scelta della strategia di misura
- software e procedura di calcolo
- ripetibilità della macchina
- condizioni ambientali (temperatura del pezzo, gradienti termici, umidità)
- capacità ed esperienza dell'operatore

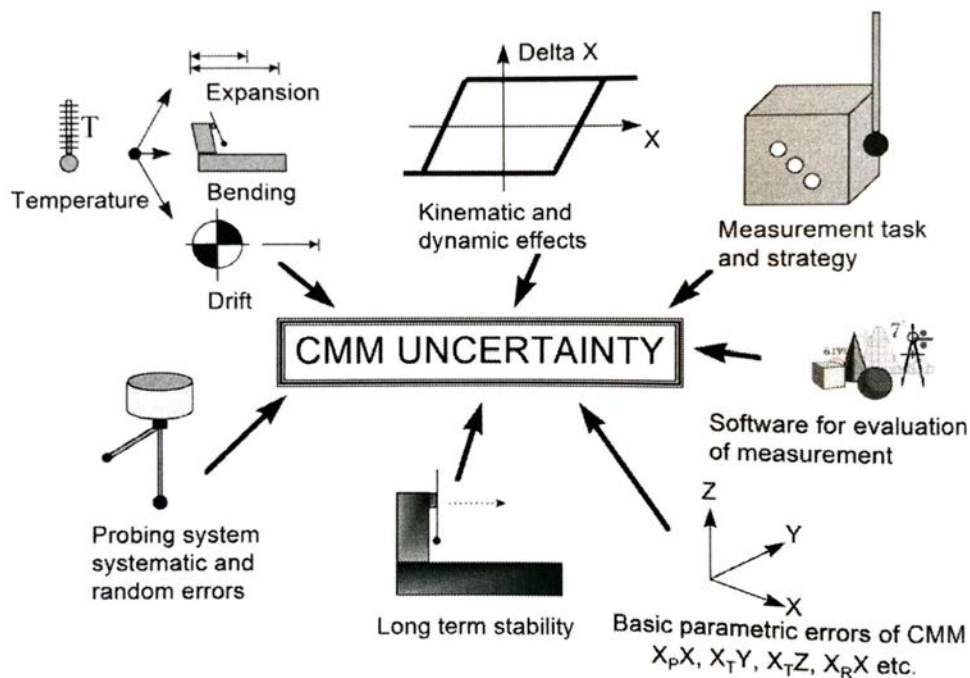


Figura 1.1: Fonti di incertezza nelle CMMs

Di seguito verranno discusse alcune delle principali fonti di incertezza raggruppate in base alla all'elemento su cui agiscono.

1. Un primo gruppo di fonti di incertezza riguardano l'*hardware*:

Possono essere causate da errori inerenti a:

- design della macchina
- alle sue scale e geometria
- al suo sistema di sondaggio
- alla sua dinamica
- all'ambiente in cui è collocata

Qui sono incluse le parti non corrette da errori parametrici, componenti casuali, errori sistematici, parametri di sondaggio (come la velocità e la distanza di avvicinamento della sonda), errori causati dalla dinamica della struttura della macchina e della sonda, dalle temperature ambientali e della macchina, infine le vibrazioni.

2. Ciò che riguarda il *pezzo*

Queste incertezze riguardano le proprietà del pezzo e l'interazione della misura con il pezzo:

- deviazioni della forma della parte
- difficoltà di accessibilità
- la distribuzione del campionamento
- gli effetti di bloccaggio (distorsione)
- la meccanica di contatto
- la finitura superficiale
- la deformazione elastica dovuta alle forze di sondaggio

tutte queste costituiscono i principali errori relativi al pezzo che portano ad incertezze. Anche le incertezze nelle trasformazioni delle coordinate verso il sistema di coordinate delle parti sono importanti.

### 3. La strategia di campionamento

Sono inclusi qui errori dovuti a:

- campionamento inadeguato
- interazione della strategia di campionamento con errore di forma
- interazioni di campionamento con forme complesse
- "ingrandimento" dell'incertezza dovuto a dati inadeguati
- esattezza incompleta del trasferimento dei risultati di misurazione tra artefatti di taratura e parti reali.

Detto di tutte le possibili fonti di incertezza, diventa di fondamentale importanza disporre di procedure certificate per la valutazione dell'incertezza di misura.

Esistono differenti approcci per la valutazione dell'incertezza di misura, con diversi gradi di rigosità e facilità di implementazione.

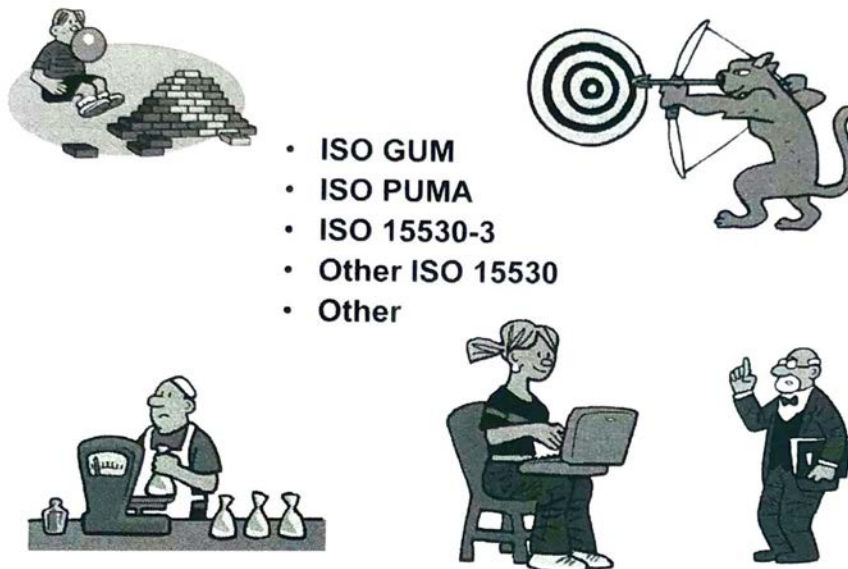


Figura 1.2: *Differenti approcci per il calcolo dell'incertezza di misura*

In accordo con il Vocabolario Internazionale di Metrologia [10], si definisce "incertezza di misura" ( $U$ ) il *parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori di quantità attribuiti a un misurando, in base alle informazioni utilizzate.*

Per quantificare l'incertezza di misura, sono necessarie due caratteristiche:

- l'intervallo, che determina la larghezza del margine (intervallo di incertezza =  $2U$ , da  $y-U$  a  $y+U$ )
- il livello di confidenza, che attesta quanto si è sicuri di trovare il reale valore del misurando all'interno del margine di incertezza; solitamente il livello di confidenza è del 95% nelle misure dimensionali

Per essere completa, la dichiarazione di un risultato di misura deve includere anche le informazioni riguardanti l'incertezza di misura (oltre che il valore attribuito al misurando ottenuto da una misurazione):

$$Y_{real} = Y_{meas} - b \pm U$$

La valutazione dell'incertezza di misura viene spesso trascurata o ignorata nei processi di misurazione, ma la sua importanza è fondamentale, senza di essa non si potrebbe avere la riferibilità della misura effettuata e non si potrebbe garantire la qualità della produzione.

Con il termine *riferibilità* si definisce la proprietà del risultato di una misura, o del valore di un campione primario, di poter essere ricondotto a determinati campioni di riferimento mediante una serie interrotta di confronti, tutti di incertezza nota. La riferibilità rappresenta uno dei requisiti fondamentali delle norme della serie ISO 9000 riguardanti il controllo della qualità industriale.

La misurazione sistematica con gradi di incertezza noti rappresenta uno dei fondamenti del controllo della qualità industriale e, in generale, nella maggior parte dei settori moderni dove i costi legati alle misurazioni rappresentano il 10-15% dei costi di produzione. Essere in grado di eseguire buone misurazioni consente di aumentare significativamente il valore, l'efficacia e la qualità di un prodotto [Howarth P. et al., 2008].

In questa prima parte vengono analizzati i vari approcci disponibili per la valutazione dell'incertezza di misura in relazione alle macchine di misura a coordinate, che presentano diversi gradi di rigidità e facilità di implementazione. Tra cui:

- ISO GUM: fornisce un metodo per la stima dell'incertezza di misura basato su tecniche statistiche. È un metodo riconosciuto a livello internazionale che risulta essere il metodo più rigoroso, ma tuttavia complesso e costoso in termini di tempo e per questo motivo è rivolto principalmente ai laboratori di taratura.

- ISO PUMA: semplificazione del metodo GUM, ed è più adatto ad applicazioni industriali in quanto richiede meno tempo per essere utilizzato perché basato su un calcolo iterativo ed approssimato in quanto i contributi di incertezza derivanti dalle singole fonti possono essere considerati non correlati ed in questo modo i calcoli dell'incertezza estesa si semplificano in maniera considerevole.
- serie ISO 15530: ha lo scopo di fornire terminologia, tecniche e linee guida per stimare l'incertezza di misura specifica del compito di misurazione quando si usano CMM. Le tecniche presentate nella serie ISO 15530 sono trattate nelle varie sezioni della norma (15530 parte 1, 2, 3)
- Giudizio di esperti: questo metodo può essere efficace per valutare una singola fonte di incertezza dominante oppure, in alcuni casi, un gruppo di fonti o un intero budget di incertezza, grazie al giudizio di esperti metrologi (esperienza decennale) che hanno capacità di valutare realisticamente l'incertezza utilizzando un metodo di tipo B.

$$Y_{real} = Y_{meas} - b \pm U$$

In ambito di macchine di misura a coordinate (CMMs) è opportuno distinguere due ambiti di incertezza: l'incertezza legata ai test di verifica di prestazioni della macchina e l'incertezza legata strettamente alla misura.

Per quantificare le prestazioni metrologiche della macchina, si fa riferimento alle procedure di:

- Verifica delle prestazioni delle CMM per misurazioni dimensionali
- Verifica delle prestazioni per CMM dotate di tavola rotante
- Verifica dei sistemi di tastatura a contatto
- Verifica delle prestazioni per CMM utilizzate in scansione continua

Descritte nella serie di normative ISO 10360.

## 1.2 ISO GUM

L'approccio descritto nella ISO *Guide to the expression of Uncertainty Measurement*, GUM (BIPM,2008) [23] è il metodo riconosciuto a livello internazionale per la valutazione dell'incertezza di misura basato su tecniche statistiche. Risulta essere un metodo rigoroso, ma tuttavia complesso e costoso in termini di tempo e per questo motivo è rivolto principalmente ai laboratori di taratura.

L'approccio prevede i seguenti steps:

- Identificazione di tutte le fonti di incertezza
- La stima del valore di incertezza secondo due metodi:

Il primo è definito come “*Valutazione di Tipo A*” e consiste nel calcolare le componenti di incertezza attraverso l'analisi statistica dei risultati di una serie di misurazioni. Il secondo invece “*Valutazione di Tipo B*” secondo cui la stima viene effettuata utilizzando un giudizio scientifico basato su tutte le informazioni disponibili come certificati di taratura, standards, specifiche del costruttore dello strumento, errori di forma ecc.

- Calcolo dell'incertezza tipo combinata  $u_c$ : Utilizzando i metodi di tipo A e di tipo B è stata stimata l'incertezza tipo per i parametri di input. Se si desidera valutare l'incertezza tipo combinata, è necessario combinare le incertezze standard utilizzando la combinazione della legge statistica della varianza.

Si definisce incertezza tipo combinata  $u_c$ . "la deviazione standard stimata associata al risultato ed essa è uguale alla radice quadrata positiva della varianza combinata ottenuta da tutte le componenti di varianza e covarianza, comunque valutata, usando quella che viene definita la legge della propagazione dell'incertezza" (definizione dal GUM).

I parametri di input possono essere correlati o non correlati. Due parametri sono correlati quando la variazione di uno provoca la variazione dell'altro. Se le variazioni dei parametri non sono direttamente collegate tra loro, i parametri non sono correlati. A volte non è semplice identificare la correlazione tra i parametri e può essere più complicato calcolare i coefficienti di correlazione. La linea guida GUM fornisce le formule necessarie per eseguire questa analisi.

- Determinazione dell'incertezza estesa  $U$ : Una volta stimata l'incertezza tipo combinata  $u_c$ , è possibile stimare l'incertezza estesa questo viene fatto riferendo il valore di  $u_c$  calcolato allo step precedente ad un livello di confidenza espresso tramite il *covrage factor*  $k$

$$U = k * u_c$$

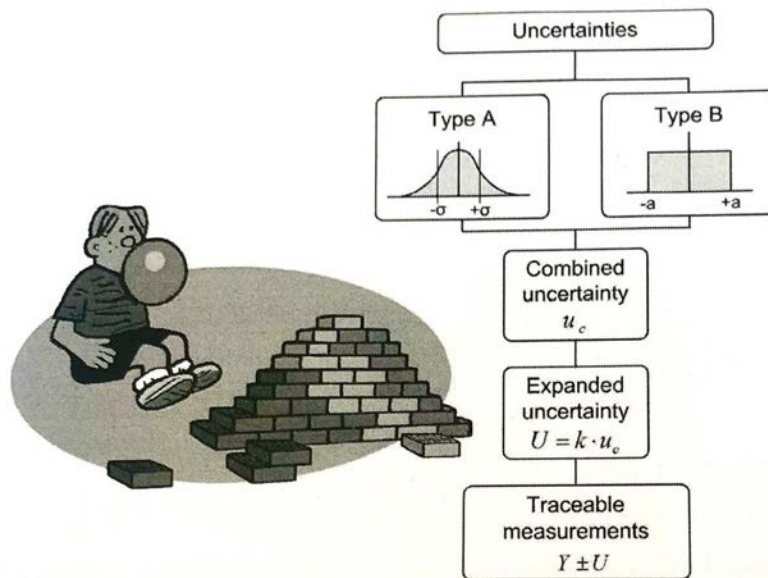


Figura 1.3: Steps del metodo GUM

## 1.2.1 ISO 14253-2, approccio PUMA

L'approccio PUMA rappresenta una semplificazione del metodo GUM ed è più adatto ad applicazioni industriali in quanto richiede meno tempo per essere utilizzato perché basato su un calcolo iterativo ed approssimato. A differenza del GUM, il metodo PUMA considera che i contributi di incertezza derivanti dalle singole fonti possano essere considerati non correlati ovvero le variazioni dei parametri non sono direttamente collegate tra loro e questo riduce di molto la complessità dei calcoli.

L'incertezza si calcola nel seguente modo:

$$U = K \sqrt{u_r^2 + u_m^2 + u_w^2 + u_e^2 + u_p^2}$$

dove:

- $k$  è il *coverage factor*, il fattore di copertura (per  $k = 2$  si ha una probabilità di circa il 95%)
- $u_r$  è il contributo di incertezza tipo del riferimento calibrato
- $u_m$  è il contributo di incertezza tipo dello strumento di misura (risoluzione, errore di scala)
- $u_w$  è il contributo di incertezza tipo del pezzo (errore di forma, rugosità)
- $u_e$  è il contributo di incertezza tipo dell'ambiente (temperatura, vibrazioni)
- $u_p$  è il contributo di incertezza tipo della procedura di misurazione (ripetibilità delle misure)

La progettazione di una misurazione viene trattato in specifico nella ISO 14253-2, che descrive come la procedura per l'incertezza con il metodo PUMA può essere utilizzato per determinare se le condizioni utilizzate con un determinato processo di misurazione, o il processo di misurazione stesso, sono adeguati per soddisfare i requisiti dell'attività di misurazione. Questi sono definiti attraverso la cosiddetta incertezza target  $U_{target}$  che si vuole avere come limite e la si va a confrontare con l'incertezza  $U$  stimata.

Va notato che le incertezze non dovrebbero essere né troppo grandi né troppo piccole perché ciò implicherebbe costi inutili e misurazioni inefficienti.

Di seguito vengono espressi gli steps per l'applicazione dell'approccio PUMA

1. È stato definito un determinato compito di misura
2. Viene scelto un valore di  $U_{target}$
3. Si definisce il processo di misura (principio di misura, procedura, condizioni di misura)
4. Si fa un bilancio di prima approssimazione di  $U$  (si sovrastima inizialmente)

5. Viene confrontato il valore di  $U$  con  $U_{target}$

A questo punto vengono fatte le seguenti osservazioni:

$$U < U_{target} \rightarrow OK$$

Altrimenti

$$U > U_{target} \rightarrow \text{si ritorna allo step 3}$$

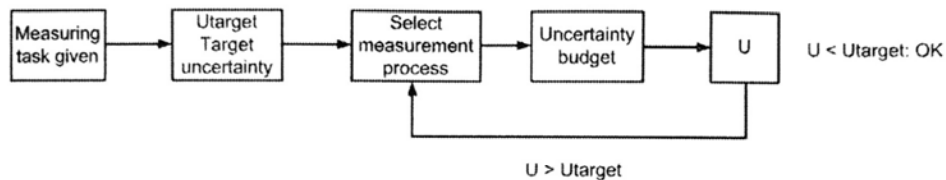


Figura 1.4: Steps del metodo PUMA

## 1.2.2 Giudizio di esperti

Il GUM riconosce le determinazioni dell'incertezza di tipo B, che rappresentano stime istruite basate sul giudizio di esperti. Un'esperienza significativa con le CMM può fornire a un esperto la capacità di stimare realisticamente l'incertezza utilizzando rigorosamente un metodo di tipo B. Questa tecnica può essere utilizzata per stimare una singola fonte di incertezza, l'effetto di un gruppo di fonti o l'intero budget dell'incertezza. L'opinione degli esperti è forse la migliore tecnica e può essere l'unica, quando non sono disponibili altri strumenti, dati di misurazione o modelli matematici.

### **1.2.3 ISO 15530 : metodi di valutazione specifici per le CMM**

La serie ISO 15530 viene utilizzata in ambito industriale per la valutazione dell'incertezza di misura di CMM e si basa sui seguenti due aspetti:

- incertezza di misura relativa ad uno specifico compito di misura
- caratteristica metrologica

Questa serie sarà descritta in dettaglio nel capitolo successivo e parte di questa normativa sarà l'attività principale di questo lavoro.

### **1.3 Prove di accettazione e verifica periodica per macchine di misura a coordinate (CMM)**

La verifica delle prestazioni delle macchine di misura a coordinate (CMM) è un compito chiave per la garanzia della qualità nei sistemi industriali, ma nonostante l'importanza delle CMM e la loro ampia diffusione in ambito industriale, risulta complicato garantire la riferibilità totale di tutte le misurazioni che possono essere effettuate.

Il primo passo per stabilire la riferibilità delle misure della CMM consiste nella verifica delle prestazioni della macchina. Per questo sono state sviluppate numerose tecniche per caratterizzare gli errori legati alla macchina e attualmente viene preso come riferimento mondiale la serie di standard ISO 10360 [11-16], che può essere considerata come requisito generale fondamentale per la riferibilità delle misurazioni a livello industriale.

I risultati delle prove sono influenzati da varie fonti di errore che influiscono sul test con il loro contributo di incertezza, pertanto risulta evidente che la corretta identificazione e quantificazione di queste fonti di errore è un compito cruciale per la corretta stima dell'incertezza del test.

Resta inoltre inteso che la conformità delle apparecchiature di misurazione alla serie ISO 10360 non è sufficiente per l'effettiva tracciabilità delle misurazioni CMM, fornita solo dalla valutazione dell'incertezza specifica dell'attività.

I test di accettazione descritti nella serie ISO 10360 forniscono solo un quadro parziale dei fattori che contribuiscono all'incertezza rilevanti nella metrologia delle coordinate, tuttavia, questo aspetto parziale è di solito abbastanza realistico e può essere un buon indicatore, in termini probabilistici, delle prestazioni effettive complessive di una CMM in condizioni di misurazione specifiche.

Il continuo miglioramento delle prestazioni della CMM e la crescente concorrenza tra produttori e fornitori di servizi di **taratura** richiedono un miglioramento delle procedure di prova. In

particolare, è necessaria una migliore e comune comprensione dell'incertezza da associare alle procedure di prova.

I risultati del test possono essere influenzati dalle fonti di errore che influiscono sul test con il loro contributo all'incertezza, pertanto è necessaria una stima dell'incertezza stessa del test per verificare la conformità o non conformità agli errori massimi consentiti (MPE) specificati dal produttore/utilizzatore per l'apparecchiatura di misurazione testata. Questo compito è fondamentale, poiché le implicazioni economiche sono rilevanti.

Tuttavia, la corretta identificazione dei fattori che contribuiscono all'incertezza da prendere in considerazione per la stima dell'incertezza del test non è un compito banale. Molte fonti di errore diverse sono rilevanti nella metrologia delle coordinate e possono essere stimate in base a metodi diversi [3], ma dobbiamo tenere presente che il compito della nostra misurazione è la valutazione delle prestazioni metrologiche della CMM in condizioni di misurazione abbastanza ben definite, parzialmente descritte nella norma applicabile e in parte deciso dall'utente CMM entro i limiti dichiarati dal produttore della CMM.

È da tenere presente che la maggior parte delle fonti di errore di una tipica misurazione con una CMM (ad esempio errori geometrici della CMM, ripetibilità, errori di sondaggio, ecc.) non devono essere considerati come fattori che contribuiscono all'incertezza nei test, poiché fanno parte del risultato della prova stessa (es. errore di indicazione) da confrontare con l'errore massimo ammesso MPE.

I test descritti nella serie ISO 10360 sono progettati per valutare le prestazioni complessive della CMM quando si esegue una misurazione specificata e non quella di un singolo componente specifico (ovvero scale, sistema di sondaggio, tavola rotante, ecc.).

È importante la corretta identificazione delle fonti di errore generate dall'ambiente, gli effetti termici influenzano fortemente sia le prestazioni complessive della CMM che i risultati dei test. Gli errori della CMM causati da variazioni di temperatura entro i limiti specificati sono tipici di qualsiasi misurazione eseguita. Questi errori sono inclusi nel risultato del test e un'adeguata strategia di misurazione unita alle variazioni di temperatura può eventualmente ridurne l'entità. Gli effetti termici da considerare come un'incertezza sono solo quelli direttamente correlati all'apparecchiatura di prova (ovvero dilatazione termica termica di standard tarati) e alla procedura di prova.

I test di accettazione mettono in evidenza errori che possono nascere nell'utilizzo del macchinario e vengono utilizzati sia per la verifica di determinate prestazione e sia come test di verifica periodica del macchinario. Di seguito saranno proposti i test di verifica, appartenenti alla serie di standard ISO 13060, più utilizzati per evidenziare l'incertezza delle CMM e trovare gli errori da esse causati.

### 1.3.1 Verifica delle prestazioni delle CMM in modalità di scansione a contatto

Gran parte delle macchine di misura a coordinate sono dotate di un sistema di scansione a contatto (o sistema di tastatura).

La norma ISO 10360-4 [14] definisce i test di accettazione e verifica per le CMM dotate di questo sistema di tastatura, i cui errori è opportuno non isolarli dalle altre fonti di errore della macchina.

In questo caso i risultati della misurazione possono venire influenzati da una possibile deviazione della forma della punta dello stilo. Per l'identificazione di tale fonte di incertezza si utilizza principalmente il Test della sonda di scansione a contatto.

Il test si basa sulla misurazione di una sfera tarata differente da quella utilizzata per la qualifica del tastatore e si eseguano 4 percorsi differenti per la scansione utilizzando 4 condizioni di misurazione diverse.

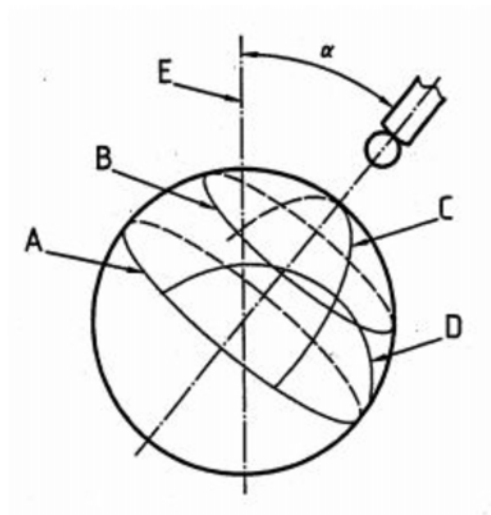


Figura 1.5: Test della sonda di scansione a contatto

I risultati del test sono rappresentati dagli errori della sonda di scansione ( $T_{ij}$ ), calcolati come intervallo di raggi tra il centro misurato e tutti i punti scansionati, tali  $T_{ij}$  dovranno essere successivamente confrontati e non dovranno essere maggiori dei rispettivi errori massimi ammessi ( $MPE T_{ij}$ ).

È opportuno scegliere orientazioni del tastatore tali per cui tutti gli assi della sonda e della CMM vengano esercitati simultaneamente durante l'esecuzione delle scansioni.

Le principali fonti di errore per l'incertezza del test della sonda di scansione a contatto possono essere:

- set-up e qualifica della sonda
- velocità di scansione troppo elevata
- deformazioni della sfera di prova
- effetti ambientali e termici
- errori di forma delle sfere di prova
- errori di forma della punta del tastatore
- errori legati al software di elaborazione dei dati di misura
- incertezza di taratura del diametro della sfera di prova

Una precisazione importante può essere fatta per il software di misurazione; le sonde di scansione a contatto vengono spesso utilizzate per compiti di misurazione speciali, come ad esempio l'ispezione della geometria a forma libera oppure misurazioni di forme, utilizzando un software dedicato. Questo software specifico per l'applicazione è talvolta separato dal software di misurazione di base della CMM in cui i test sono generalmente implementati. Per questo è importante che gli utenti di CMM implementino i test in condizioni il più vicino possibile all'utilizzo effettivo della CMM nell'attività quotidiana, al fine di avere un quadro più realistico delle prestazioni metrologiche della CMM utilizzando la sonda di scansione. In caso contrario, è necessario prendere in considerazione un ulteriore contributo di incertezza, poiché l'uso di un software diverso può modificare le prestazioni di una CMM, come riportato nell'esempio sotto, il quale mostra i diversi risultati ottenuti su una CMM commerciale utilizzando due diversi software di misurazione, tutte le altre condizioni restano costanti.

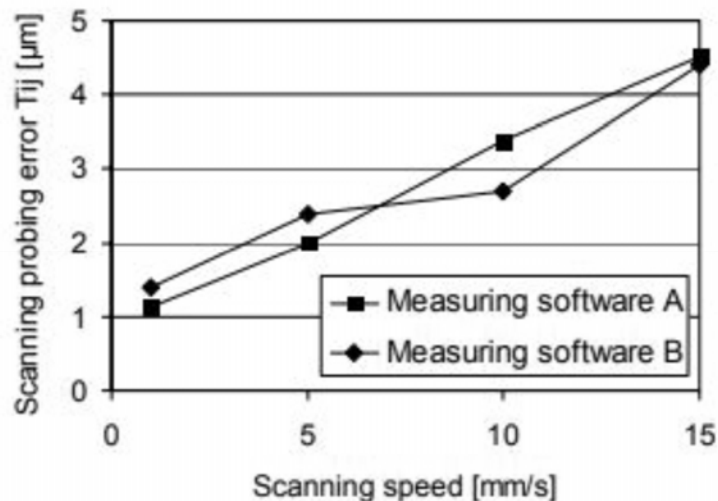


Figura 1.6: Risultati del test della sonda di scansione a contatto utilizzando due diversi software di misurazione

<b>Fonte di errore</b>	<b>Considerato nell'incertezza del test</b>
Errori della scansione a contatto (inclusi effetti di qualifica della sonda, posizione della sfera ed orientamento)	NO
Altri errori della CMM (rilevamento, ripetibilità etc.)	NO
Velocità di scansione	NO
Deformazioni dell'artefatto	SI
Effetti termici sull'artefatto	se i dati sono inseriti dal tester
Errori di forma delle sfere di prova	SI
Errori di forma della punta del tastatore	se fornito dal tester
Software di misura	se è utilizzato un altro software dal tester
Altri contributi significativi	se segnalati dal tester

Tabella 1: *Riepilogo dell'incertezza del test della sonda di scansione a contatto*

### **1.3.2 Verifica delle prestazioni per CMM nei sistemi di tastatura a contatto**

Definita dalla norma ISO 10360-5 [15] per i test di accettazione e di verifica per sistemi a singolo tastatore o a tastatore multiplo utilizzati in modalità punto-punto. Gli errori di tastatura vengono identificati mediante l'utilizzo di una sfera di riferimento (diversa da quella fornita insieme alla CMM per la qualifica del tastatore) la quale viene tastata in 25 punti distribuiti casualmente e su di essa si vanno a misurare forma, locazione e dimensione. La gamma delle 25 distanze radiali ( $P = R_{max} - R_{min}$ ) non deve essere superiore al valore dichiarato dal produttore (MPE).

È importante che prima di iniziare il test, la forma della sfera di prova utilizzata nel test sia **tarata**, poiché la deviazione di forma influenza il risultato della prova ed è un parametro da considerare durante la verifica della conformità o della non conformità alle specifiche.

Attraverso questo test vengono definiti i seguenti errori del sistema tastatore:

- $MF$  = errore di forma del sistema tastatore (sfericità)
- $MS$  = errore di dimensione del sistema tastatore (diametro)
- $ML$  = errore di posizione del sistema tastatore (centro)

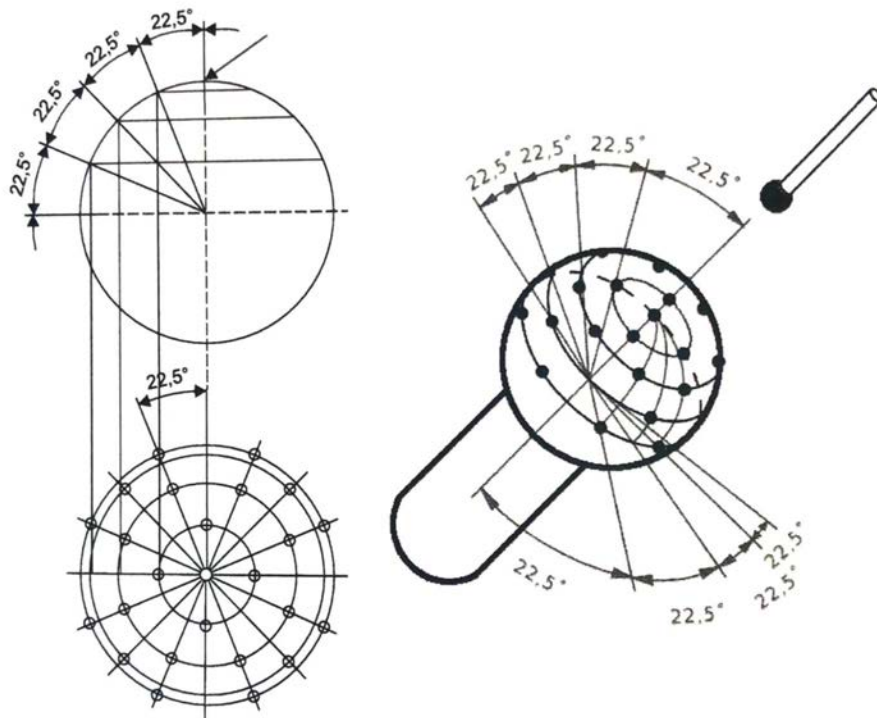


Figura 1.7: rappresentazione schematica della distribuzione dei punti misurati sulla sfera di riferimento nel caso di tastatura a contatto:

### 1.3.3 Verifica delle prestazioni delle CMM per misurazioni dimensionali

La norma ISO 10360-2 [12] specifica i test di collaudo per la verifica delle prestazioni di una macchina a misura di coordinate CMM utilizzata per misurazioni dimensionali. La verifica delle prestazioni della macchina viene effettuata mediante la misura di una serie di elementi di campioni di lunghezza, come blocchetti piano paralleli o calibri e prevede la misurazione di 5 elementi differenti misurati 3 volte in 7 posizioni diverse del volume di lavoro della macchina per un totale di 105 risultati di misura.

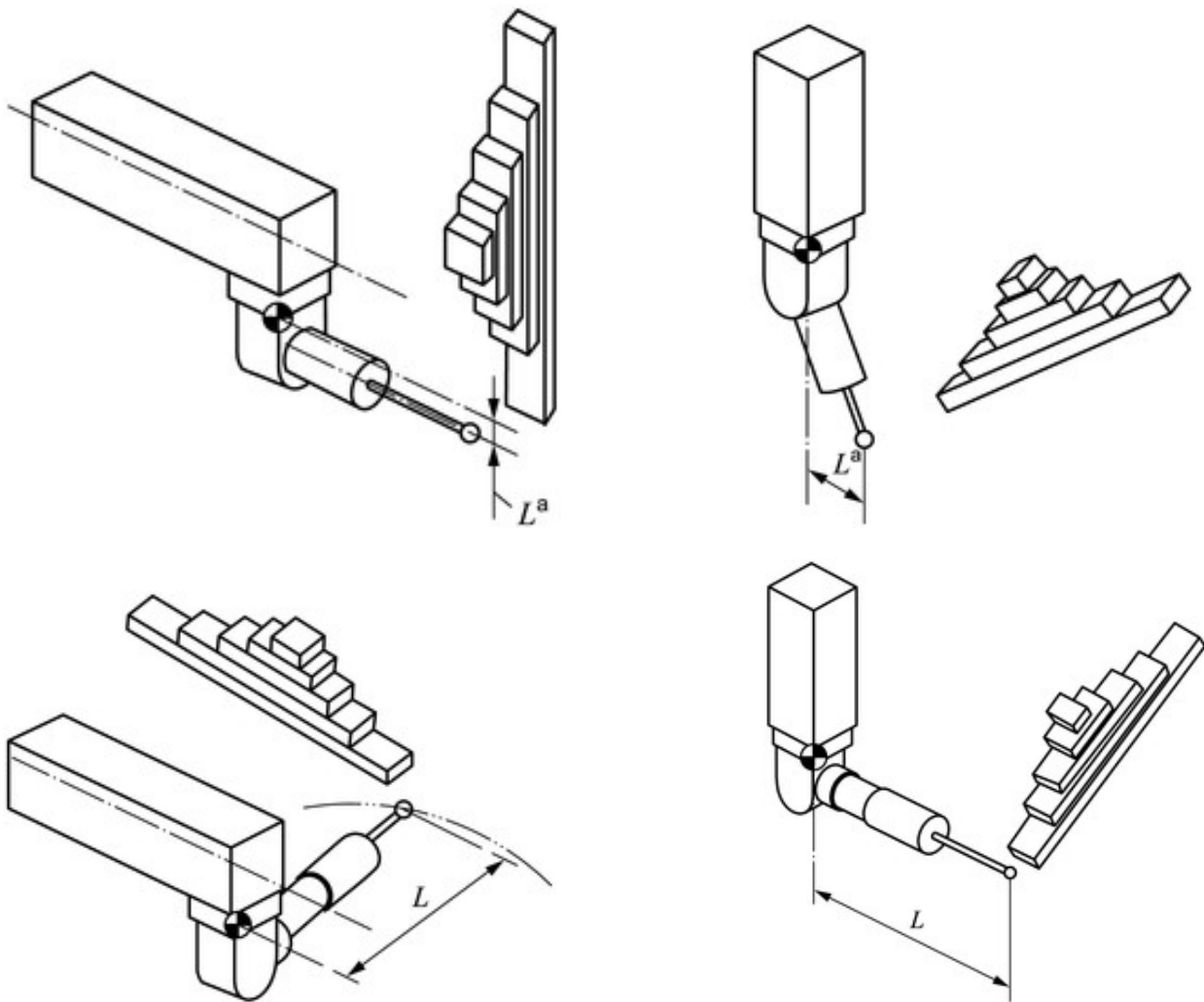


Figura 1.8: Esempi misura di una serie di elementi di campioni di lunghezza nel caso di un sistema di sondaggio articolato, considerando l'offset dell'elemento di contatto dello stilo dall'asse del cannotto

È prevista anche una prova per valutare le prestazioni del tastatore su una sfera tarata per errore di forma (probing error).

Questi test consentono di determinare la riferibilità diretta dei risultati di misura con il metro e di capire quali saranno le prestazioni della CMM durante la misura di lunghezze simili.

Con l'esecuzione della prova vengono definiti:

- il Massimo Errore Ammissibile MPE come da estratto della norma ISO 10360-1
- L'errore d'indicazione per misure di dimensioni  $E$  che non deve superare il massimo errore ammissibile  $MPE_E$  stabilito dal costruttore

- L'errore di tastatura P che non deve superare il massimo errore ammissibile  $MPE_p$  stabilito dal costruttore

La verifica dell'errore di indicazione per misure di dimensioni E si effettua misurando una serie di campioni di lunghezza, aventi certificato di taratura, e si compara il loro valore con quello misurato dalla CMM.

I campioni sono di 5 differenti dimensioni e sono misurati in 7 differenti posizioni/orientamenti all'interno del volume di misura della CMM e vengono misurati per 3 volte. In totale verranno effettuate 105 misure.

Per ciascuna delle 105 indicazioni si calcola l'errore E secondo la formula:

$$E = \text{Valore indicato} - \text{Valore di taratura}$$

Per la verifica dell'errore di tastatura si utilizza una sfera di diametro compreso tra 10 e 50 mm tarata per l'errore di forma. La sfera deve essere differente da quella fornita dal costruttore ed utilizzata per qualificare il tastatore.

Si effettuano 25 punti di contatto, in modo uniforme sulla semisfera, a scelta dell'utilizzatore, come rappresentato in Fig. 1.9

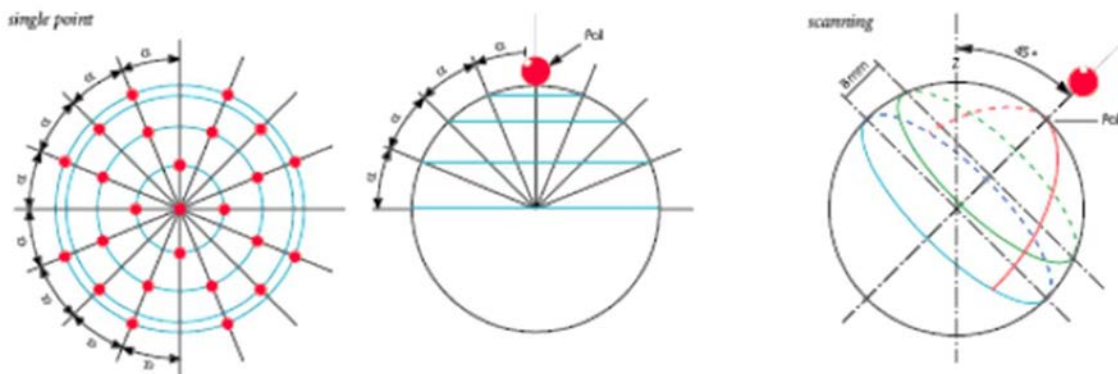


Figura 1.9 Distribuzione dei punti di tastatura nella sfera per il test

Si utilizzano i 25 valori per calcolare l'elemento sferico gaussiano associato, e si ricalcolano le distanze radiali  $R_i$  di ciascun punto dal centro della sfera elemento sostitutivo. Si definisce l'errore di tastatura P come dalla formula:

$$P = R_i \max - R_i \min$$

## Capitolo 2

# La serie ISO 15530: Metodi per la valutazione dell'incertezza per macchine di misura a coordinate (CMM) in ambito industriale

Come descritto nel capitolo precedente, le macchine di misura a coordinate (CMM) sono sistemi complessi con numerose fonti di errore. Per quantificare le performance di misura di una CMM sono previste le norme nella serie ISO 10360 [11-16], che specificano dei test per l'accettazione e la verifica della macchina. È bene ricordare che sebbene i risultati di questi test possano essere utilizzati per determinare alcuni contributi di incertezza per i tipi specifici di misure di lunghezza e forma, tali metodologie sono insufficienti per determinare in maniera comprensiva l'incertezza di una specifica misura.

Per questo motivo è stata sviluppata la serie di normative ISO 15530 [1-4], che si pone come scopo quello di fornire terminologia, tecniche e linee guida per stimare l'incertezza di misura specifica del compito di misurazione quando si usano macchine di misura a coordinate (CMM).

Come descritto precedentemente, è noto che diversi aspetti tra cui l'influenza del sistema di misurazione a coordinate, la strategia di campionamento, gli effetti ambientali, la variabilità dell'operatore e qualsiasi altro fattore, possono influire sul risultato della misurazione effettiva.

Le tecniche presentate nella serie ISO 15530 che consentono di valutare queste fonti di incertezza sono conformi sia alla ISO 14253-2 che alla ISO GUM (che fornisce un approccio al calcolo dell'incertezza tipo ed estesa) e, anche se sono state sviluppate specificatamente per le CMM, possono essere applicate a qualsiasi apparecchiatura di misura per la verifica di GPS.

La serie ISO 15530 è suddivisa in cinque parti:

- Parte 1: descrizione, terminologia e introduzione al problema [4]
- Parte 2: valutazione dell'incertezza tramite l'uso della tecnica multiple measurement strategy [3]
- Parte 3: valutazione dell'incertezza mediante l'uso di campioni o pezzi tarati [2]
- Parte 4: valutazione dell'incertezza mediante l'utilizzo della simulazione al computer [1]

- Parte 5: valutazione dell'incertezza mediante il giudizio di esperti

Alcune parti della normativa, come la parte 2 e la parte 5, sono ancora in fase di sviluppo. Infatti, è obbiettivo di questa tesi sperimentare la bozza di normativa della ISO 15530 parte 2 per raccogliere informazioni riguardo la sua validità e applicabilità.

## **2.1 ISO 15530 parte 1: descrizione e terminologia**

La parte 1 della normativa ISO 15530 fornisce terminologie, tecniche e guide linea per la stima dell'incertezza di misura di un compito specifico quando si utilizza una macchina di misura a coordinate (CMM). Queste tecniche consentono di valutare le fonti di incertezza che influenzano una determinata misura tra cui: l'influenza del sistema di misura a coordinate, la strategia di campionamento, gli effetti ambientali, la variabilità dell'operatore e qualsiasi altro fattore che influisce sul risultato effettivo della misura.

Sono presenti due concetti importanti:

1. incertezza di misura relativa ad uno specifico compito di misura:

si intende l'incertezza estesa  $U$  che contiene tutti i contributi di incertezza relativi al processo di misura, includendo la CMM, il sistema di tastatura, la strategia di campionamento, la posizione e l'orientazione del pezzo, il sistema di fissaggio, contaminazioni e condizioni termiche.

2. caratteristica metrologica:

si intende la caratteristica di un dispositivo di misura che può influenzare il risultato di misura e che può determinare un immediato contributo di incertezza.

## **2.2 ISO 15530 parte 3: Valutazione dell'incertezza tramite l'utilizzo di pezzi tarati o campioni di misura**

Il concetto di base di questo approccio espresso nella parte 3 della norma ISO 15530 [2] è quello di eseguire misurazioni utilizzando pezzi tarati o campioni di misura di dimensioni e geometrie simili a quelle dei pezzi reali per la valutazione dell'incertezza di una macchina CMM seguendo una procedura sperimentale, una pratica generale ben nota in metrologia.

La stima dell'incertezza seguendo alcuni dei metodi di valutazione, come con l'approccio GUM, è spesso molto complessa quando si utilizzano sistemi di misurazione come le CMM ed è probabile

che si presenti il rischio di una stima non realistica della stessa incertezza legata alla misurazione, inoltre risulta impossibile da eseguire a livello industriale.

Le limitazioni del metodo sono legate alla disponibilità di artefatti con precisione, stabilità, costi ragionevoli e incertezza di calibrazione sufficientemente piccole. Una limitazione più generale è la necessità di pezzi tarati o standard simili ai pezzi che vengono generalmente misurati, in relazione ai costi necessari per l'acquisto, la conservazione, la manutenzione e la **calibrazione taratura**. Questi costi possono essere inaccettabili quando si tratta di eseguire una grande varietà di attività di misurazione. Tenendo inoltre in considerazione che tutti i pezzi tarati devono essere inizialmente tarati da un laboratorio metrologico, richiedendo una attenta valutazione dell'incertezza, anche in questo caso si ripresenta il problema di come calcolarla.

Il vantaggio nell'applicazione di questo metodo sta nella semplicità operativa richiesta per l'esecuzione delle misurazioni sulla CMM, infatti la valutazione dell'incertezza di misura in questo caso risulta essere una sequenza di misurazioni eseguita nello stesso modo e nelle stesse condizioni delle misurazioni effettive, ma al posto dei pezzi reali vengono misurati dei pezzi tarati o campioni di misura di dimensioni e geometri simili. Per la stima dell'incertezza vengono considerate le differenze tra i risultati ottenuti dalla misurazione dei campioni ed i valori di taratura noti da certificato.

Questa procedura è applicabile per *misure non-sostitutive* dei pezzi o dei campioni, dove il risultato di misura è dato dalle indicazioni delle CMM; allo stesso modo è applicabile per *misure sostitutive* dove invece viene utilizzato un campione di verifica per correggere gli errori sistematici della CMM.

Per questa metodologia, i principali contributi di incertezza sono:

- procedura di misurazione
- taratura dei campioni utilizzati
- variazioni dei pezzi misurati (deviazioni di forma, coefficiente di espansione, condizioni superficiali)
- variazioni delle condizioni ambientali

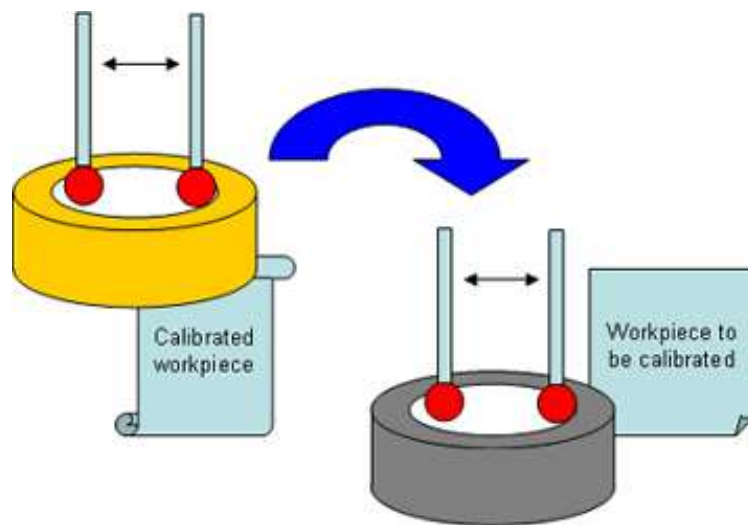


Figura 2.1: Esempio di misurazione usando l'approccio di sostituzione

## 2.2.1 Requisiti: condizioni operative

Non è corretto iniziare la procedura di misurazione se prima non sono stati eseguiti determinati procedimenti atti a garantire il corretto funzionamento della macchina di misura a coordinate e le condizioni operative.

È necessario per primo inizializzare la CMM e procedere con le operazioni di configurazione e qualifica del sistema di tastatura nelle modalità prescritte dal costruttore, assicurandosi che nell'ambiente ci siano condizioni termiche adeguate (l'ambiente di lavoro che deve essere tenuto ad una temperatura di circa 20°C) e lo stesso per i dispositivi di compensazione della macchina (temperatura, flessione stelo).

Il metodo proposto nella Parte 3 della serie ISO 15530 prevede che ci sia condizione di similarità sia per l'attività di valutazione dell'incertezza che per l'attività di acquisizione delle misure effettive, ovvero che siano verificati dei requisiti di similitudine tra il campione utilizzato per la stima dell'incertezza e il pezzo oggetto della misura. Ciò significa che le caratteristiche geometriche, deviazioni di forma, rugosità, caratteristiche del materiale, strategia di misurazione, configurazione del tastatore e le condizioni ambientali devono essere approssimativamente le stesse in entrambi i casi.

I requisiti di similitudine sono richiesti per i seguenti elementi:

1. dimensione e geometria:

fa riferimento al pezzo coinvolto nelle misure effettive e del pezzo tarato utilizzato per la valutazione dell'incertezza di misura. Le condizioni che devono essere replicate sono l'orientazione e la posizione dei due tipi di pezzi.

2. procedura di misura:

particolare attenzione alle condizioni che devono essere replicate, tra cui movimentazione, cambio e serraggio, tempo trascorso tra punti di ispezione, procedure di carico e scarico, misurazione della forza e della velocità.

3. condizioni ambientali:

le condizioni che devono essere replicate sono temperatura il suo tempo di stabilizzazione.

<b>Parametro</b>	<b>Requisiti</b>
Caratteristiche dimensionali: dimensioni	identica entro il 10% se oltre 250 mm identica se compresa tra 25 mm e 250 mm
Caratteristiche dimensionali: angolo	identico entro un range di $\pm 5^\circ$
Deviazione di forma e rugosità superficiale	Simile a causa delle proprietà funzionali
Proprietà del materiale	Simile a causa delle proprietà funzionali
Strategia di misura	Identica
Configurazione del sistema di tastatura	Identica

Tabella 2.1: riepilogo delle Condizioni di similitudine

## 2.2.2 Valutazione dell'incertezza con pezzi tarati

La procedura illustrata all'interno della norma ISO 15530-3 consente la valutazione dell'incertezza mediante l'utilizzo di pezzi tarati. È necessario predisporre dell'attrezzatura necessaria per questo scopo, in particolare:

- sistema di tastatura qualificato all'inizio di ogni procedura
- Almeno un pezzo tarato con caratteristiche metrologiche che devono essere tarate con un'incertezza nota e sufficientemente bassa per soddisfare i requisiti del compito di misurazione

L'incertezza indicata per la taratura dei pezzi tarati dovrebbe essere valida per la strategia di misura utilizzata durante le misure effettive e la valutazione dell'incertezza. Quindi il misurando del pezzo calibrato deve essere uguale al misurando valutato nel processo di incertezza di misura.

La scelta della strategia di misura non è vincolata ma l'operatore della CMM ha la facoltà di stabilire liberamente quale strategia utilizzare, ma che deve naturalmente essere in accordo e soddisfare i requisiti tecnici.

Conseguenza del fatto di avere la stessa strategia di misura e le stesse condizioni, dovrebbe consentire di avere le misure effettive e quelle per la stima dell'incertezza (in cui al posto dei pezzi verranno misurati degli standard) uguali. Questo implica lo smontaggio ed il rimontaggio del pezzo tarato dall'attrezzatura alla fine di ogni ciclo, inoltre le posizioni e le orientazioni in cui viene misurato il pezzo tarato devono essere simili alle posizioni utilizzate per il pezzo reale.

Solitamente si dispone di pochi pezzi tarati, quindi per ottenere un numero sufficiente di campioni per la valutazione dell'incertezza, devono essere eseguiti almeno 10 cicli di misurazione ed un totale di almeno 20 misurazioni sui pezzi tarati di cui la posizione e l'orientamento dovranno sistematicamente essere variati entro i limiti dati dalla procedura delle misurazioni effettive

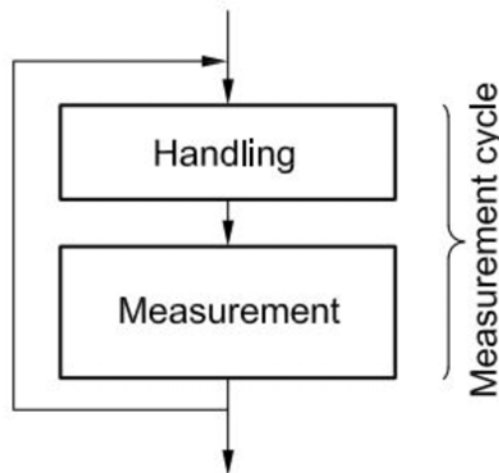


Figura 2.2: Ciclo di misura per misure non-sostitutive

La ISO 15530-3 prevede la formulazione dell'incertezza estesa  $U$ , prendendo in considerazione quattro contributi di incertezza tipo ed è espressa dalla formula:

$$U = K * \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2}$$

- $K$  è il fattore di copertura (per  $k = 2$  si ha una probabilità di circa il 95% che rappresenta il grado di confidenza, cioè la possibilità di trovare il valore del misurando all'interno dell'intervallo)
- $u_{cal}$  è l'incertezza tipo associata all'incertezza della taratura del pezzo tarato indicato nel certificato di taratura

Questo contributo viene valutato come il rapporto tra l'incertezza di misura estesa dello standard ed il fattore di copertura (entrambi indicati nel certificato di taratura)

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k}$$

- $u_p$  è l'incertezza tipo associata alla procedura di misurazione sulla CMM del pezzo tarato

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$\text{con } \bar{y} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i$$

ed  $n$  corrisponde al numero di misurazioni effettuate

$u_b$  è l'incertezza tipo associata all'errore sistematico del processo di misurazione valutato utilizzando il pezzo tarato.

Questo contributo di incertezza è tipicamente dominato dagli effetti termici che agiscono sul pezzo tarato e può essere valutato usando la formula:

$$u_b = (T - 20) * u_a * l$$

- $u_a$  è l'incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica del pezzo tarato
- $T$  è la temperatura media del pezzo tarato durante la procedura di valutazione dell'incertezza
- $l$  è la dimensione misurata
- $u_w$  è l'incertezza tipo associata a variazioni di materiale e produzione (a causa della variazione del coefficiente di dilatazione termica, errori di forma, rugosità, elasticità e plasticità)

$$u_w = \sqrt{u_{wt}^2 + u_{wp}^2}$$

- $u_{wp}$  copre l'influenza delle variazioni degli errori di forma e rugosità
- $u_{wt}$  è riferita al pezzo su cui devono essere fatte le misure effettive, ha la stessa formulazione di  $u_b$

Uncertainty component	Method of evaluation (according to the GUM <sup>a</sup> )	Designation
Geometrical errors of CMM	A	Assessed in a sum $u_p$
Temperature of CMM		
Drift of CMM		
Temperature of workpiece		
Systematic errors of probing system		
Repeatability of the CMM		
Scale resolution of the CMM		
Temperature gradients of the CMM		
Random errors of the probing system		
Probe changing uncertainty		
Errors induced by the procedure (clamping, handling, etc.)		
Errors induced by dirt		
Errors induced by the measuring strategy		
Calibration uncertainty of the calibrated workpiece	B	$u_{cal}$
All the factors contributing to $u_p$ and the thermal environment during the assessment of the calibrated workpiece	B	$u_b$
Differences among workpieces and the calibrated workpiece in — roughness — form — coefficient of thermal expansion — elasticity	A or B	$u_w$
NOTE The list of uncertainty contributors may not be exhaustive.		
<sup>a</sup> ISO/IEC Guide 98-3.		

Figura 2.3: Contributi di incertezza in accordo con la ISO 15530-3

Esiste una procedura spesso utilizzata, denominata “metodo di sostituzione” che serve per correggere l’influenza degli errori sistematici della CMM. Questo avviene aggiungendo, al ciclo di misura standard, anche la misurazione di un ulteriore campione. A seguito di questa ulteriore misurazione e confrontando il risultato della CMM col valore tarato del campione, si ricava uno scostamento  $\Delta i$  che viene quindi applicato, sommato alla misurazione fatta sui pezzi reali. Però questo campione utilizzato per la correzione degli errori sistematici non può essere utilizzato come campione tarato per la stima dell’incertezza, perché quest’ultimo ha il compito di stimare l’incertezza di misura attraverso l’analisi dello specifico compito di misura.

Il risultato delle misure della CMM verrà corretto in questo modo:

$$y_i = y_i * + \Delta i$$

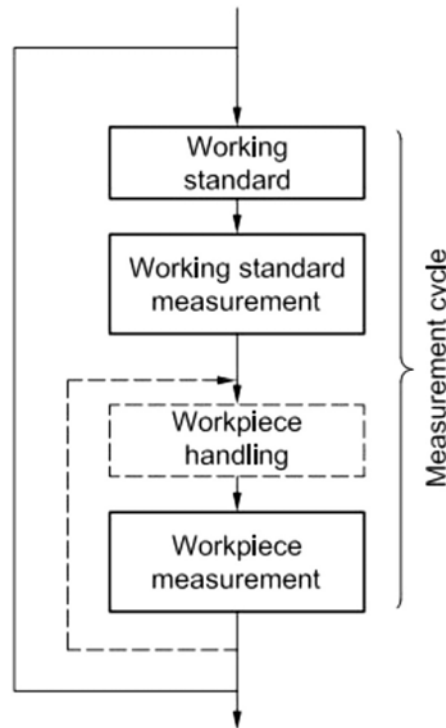


Figura 2.4: Ciclo di misura per l'applicazione del metodo di sostituzione

### 2.3 ISO 15530-4: Valutazione dell'incertezza di misura mediante l'utilizzo della simulazione al computer

Le macchine di misura a coordinate CMM sono in grado di svolgere compiti di misura di notevole complessità e molteplicità, proprio per questo motivo la formulazione di un budget di incertezza classico risulta essere impraticabile per la maggior parte delle attività di misura. Per questo si è cercato di sviluppare e mettere a disposizione un software di valutazione dell'incertezza (UES) che consenta di valutare l'incertezza di misura in modo più semplice. Si tratta di un modello matematico virtuale del processo di misurazione, rappresentativo del completo processo di misura a partire dal misurando fino ad arrivare ai risultati di misura, prendendo in considerazione le relativa quantità di influenza per l'incertezza di misura.

Il modello prevede la simulazione della variazione delle quantità di influenza per l'incertezza all'interno di un range di valori che esse possono assumere (basato su una distribuzione di

probabilità). Il processo di misurazione viene ripetutamente simulato sfruttando le possibili combinazioni delle quantità di influenza; conseguentemente si può determinare l'incertezza attraverso la variazione dei risultati ottenuti.

Il seguente metodo per il calcolo dell'incertezza di misura è specificato all'interno della parte 4 della norma ISO 15530 ed è conforme con i principi internazionali della *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. Inizialmente considera le dichiarazioni che identificano le quantità di influenza che possono essere considerate dal software di valutazione dell'incertezza (UES) per la valutazione dell'incertezza, insieme ai loro intervalli di valori. Ad esempio, alcuni software UES sono in grado di includere gli effetti dell'uso di più stili durante una misurazione con una CMM. Per quanto riguarda le quantità di influenza non incluse nella valutazione dell'incertezza di misura da parte dell'UES quest'ultime dovranno essere valutate in maniera indipendente dall'operatore e dovranno essere combinate in modo appropriato con quelle valutate dal modello matematico computerizzato, al fine di produrre una dichiarazione di incertezza conforme con i principi fondamentali del GUM

Check box	Influence factor	Additional information
	<b>CMM types (see ISO 10360-1)</b>	
	moving bridge	
	fixed bridge	
	column	
	moving table cantilever	
	fixed table cantilever	
	moving ram horizontal arm	
	moving table horizontal arm	
	fixed table horizontal arm	
	L-shaped bridge	
	gantry	
	dual ram	
	<b>CMM accessories</b>	
	rotary table	
	<b>CMM errors</b>	
	rigid-body errors	
	static, nonrigid-body geometry errors	
	dynamic machine geometry errors	
	part loading effects	
	<b>CMM environmental conditions</b>	
	non 20° C temperature	Range:
	thermal compensation applied to CMM	Range:
	spatial gradients	Up to:
	thermal variations in time	Up to:
	algorithm software accuracy	
	hysteresis	

Figura 2.5 Esempio di dichiarazione di alcune quantità di influenza

### 2.3.1 Il software di valutazione dell'incertezza (UES)

Alla base del modello del processo di misurazione impiegato dall'UES c'è la relazione matematica tra le grandezze in ingresso, comprese le grandezze misurabili e d'influenza, e il risultato della misurazione in uscita. Il software di valutazione dell'incertezza non richiede che il modello sia descritto da un'espressione matematica chiusa, quindi algoritmi numerici, come il calcolo delle

caratteristiche associate o il filtraggio dei punti di misurazione, possono essere inclusi nel modello. Proprio per questo risulta essere particolarmente adatto per processi di misurazione complessi come quelli per le misure con una CMM.

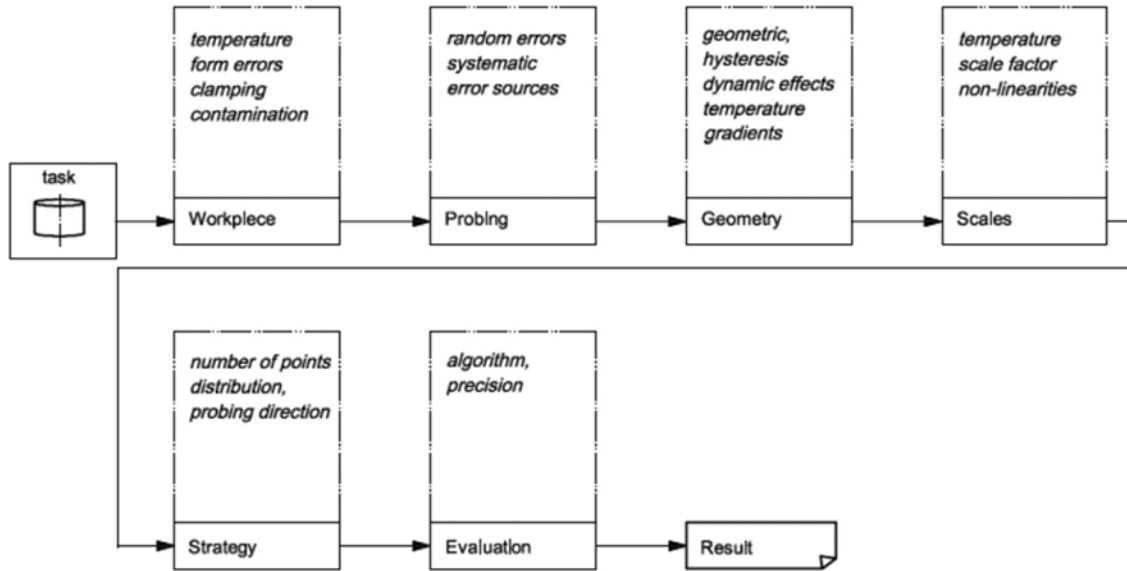


Figura 2.6 schematizzazione del software di valutazione dell'incertezza (UES)

Difficilmente si riesce a prendere in considerazione tutte le possibili influenze di incertezza nel modello, quindi è necessario valutarle con altre procedure e aggiungerle al calcolo dell'incertezza totale, tenendo presente che i parametri della misurazione simulata, importanti dal punto di vista metrologico, siano il più possibile simili a quelli della misurazione reale.

Il modello UES prevede la valutazione dell'incertezza tipo di misura calcolata come:

$$u = \sqrt{u_{sim}^2 + \sum_{i=1}^n u_i^2}$$

da cui si calcola l'incertezza estesa:

$$U = k * u$$

- $k$  = fattore di copertura (coverage factor)  $k=2$  per probabilità al 95%
- $u_{sim}$  è il contributo di incertezza legato alla simulazione
- $u_i$  sono i contributi di incertezza legati alle quantità che non sono state prese in considerazione nella simulazione, ma sono state valutate con altri metodi appropriati.

## 2.3.2 Test di prova del software di valutazione dell'incertezza (UES)

Ciò che bisognerebbe fare in un test ideale, per ogni misurando, è far variare tutte le possibili quantità di influenza dell'incertezza di misura in tutta la loro estensione, ma questo risulterebbe impossibile da fare nella realtà, in quanto richiederebbe la necessità di svolgere migliaia di misure su un gran numero di CMM e implicherebbe anche costi elevati come test pratico.

Sono previsti una serie di metodi al fine di risolvere questo problema e permettere di testare il software di valutazione dell'incertezza (UES), sfruttando sia misurazioni fisiche che misurazioni software come descritto dalla procedura prevista dalla Parte 4 della serie ISO 15530

Nella ISO 15530:4 sono disponibili quattro metodi che potrebbero essere utilizzati per testare l'UES, cercando di garantire la maggior completezza possibile. Importante precisare il fatto che nessuno di questi quattro metodi può essere utilizzato singolarmente nella pratica come test completo. Il superamento di un test non implica il fatto di avere un software a disposizione sempre perfetto, anzi l'affidabilità del metodo di valutazione dell'incertezza tramite simulazione al calcolatore aumenta dunque all'aumentare del numero di test superati. Anche il fallimento di un test può essere importante perché permette di rivelare problemi nell'UES.

I quattro metodi sviluppati sono:

- test fisici su una singola CMM
- verifica e valutazione assistita al computer
- confronto con risultati di riferimento specifici
- indagini statistiche a lungo termine

### 2.3.2.1 Test fisici su una singola CMM

Questo primo metodo prevede di eseguire diverse misure utilizzando un pezzo tarato, la cui taratura deve essere fatta tramite procedura indipendente, per confrontare statisticamente le deviazioni osservate del valore tarato con le incertezze riportate dal software di valutazione dell'incertezza.

La misurazione di tale oggetto tarato, eseguita su una CMM reale, ha lo scopo di determinare l'incertezza di misura. È fortemente raccomandato durante la procedura di misurazione di variare anche la strategia di misura in particolare la posizione e l'orientamento dello standard di prova e la distribuzione dei punti acquisiti nella misurazione, eseguendo varie misure al fine di verificarne l'influenza sull'incertezza di misura dichiarata. I risultati reali della misurazione  $y$  vengono calcolati e le relative incertezze  $U$  sono determinate mediante simulazione.

Andando ad eseguire un numero di misurazioni adeguato si riesce a controllare se l'intervallo di copertura dell'incertezza è verificato. Il criterio dovrebbe essere soddisfatto per un determinato

livello di confidenza (95% per  $k = 2$ ) e secondo questo una dichiarazione di incertezza è plausibile quando:

$$\frac{|y - y_{cal}|}{\sqrt{U_{cal}^2 + U^2}} \leq 1$$

- $y$  è il risultato della misura
- $y_{cal}$  è il valore di taratura
- $U_{cal}$  è il valore dell'incertezza estesa del pezzo tarato
- $U$  è il valore dell'incertezza estesa al compito specifico di misura

La norma prevede come obiettivo del test quello di ottenere una relazione tra  $U_{cal}$  ed  $U$ ; tale che sia  $U_{cal} \ll U$ , maggiore è  $U_{cal}$  riferita allo standard utilizzato, meno significativo risulterà essere il test.

Importante precisare che questo metodo verifica il software di valutazione dell'incertezza (UES) in relazione ad una singola dunque specifica CMM. Quindi è opportuno eseguire un re-test ad intervalli regolari, anche se l'UES non è stato modificato, tali situazioni si presentano quando:

- la CMM è stata modificata
- uno o più parametri di input dell'UES sono stati cambiati
- le condizioni ambientali sono state modificate oltre l'intervallo specificato
- ci sono dubbi sulle incertezze determinate

### 2.3.2.2 Verifica e valutazione assistita al calcolatore

Il seguente metodo prevede l'utilizzo di una tecnica di simulazione al calcolatore per testare e valutare il software di valutazione dell'incertezza (UES) andando a simulare un compito di misura. La misurazione è simulata e grazie al processo CVE (*Computer-aided Verification and Evaluation*) è noto il valore reale della misura, quindi è possibile trovare eventuali errori. Conseguentemente l'UES produce una dichiarazione di incertezza per questa misura e attraverso un semplice confronto può determinare se l'errore della misura simulata è contenuto nella regione di incertezza riportata dal software in esame.

Le condizioni con le quali si svolge questa procedura possono variare e può essere ripetuta molte volte. Le statistiche possono essere determinate in base alla frequenza con cui gli errori di misurazione sono contenuti nei corrispondenti intervalli di incertezza segnalati. Questa tecnica può essere utilizzata a patto di fornire all'UES alcune informazioni riguardo alla macchina CMM, ad esempio per quanto riguarda le prestazioni occorre sapere:

- il *Maximum Permissible Error*  $MPE_{E,0}$  in accordo con ISO 10360-2
- $\max \{MPE_{E,0x}; MPE_{E,0y}; MPE_{E,0z}\}$  (specifiche di misura delle prestazioni lungo gli assi della macchina)
- $MPE_{r,0}$  (specifica sulla ripetibilità delle misure)
- nessuna delle precedenti, ma piuttosto alcune misure con artefatti tarati come specificato dall'UES
- nessuna delle precedenti, ma piuttosto un gran numero di misure con artefatti tarati come specificato dall'UES

Questo metodo consente di riprodurre alcuni dei comportamenti comuni e le fonti di errore di una CMM in un programma apposito sul calcolatore. Questa macchina di misura a coordinate ora può essere utilizzata per produrre il valore di MPE associabile ad essa e questo valore può essere utilizzato come input per l'UES. La stessa CMM può essere usata per determinare l'errore di misura e capire quindi se l'errore di misura fosse già all'interno dell'incertezza dichiarata. Da notare che questo metodo dipende dal modello utilizzato, dalla fedeltà dei valori dei parametri e dalla selezione dei parametri stessi.

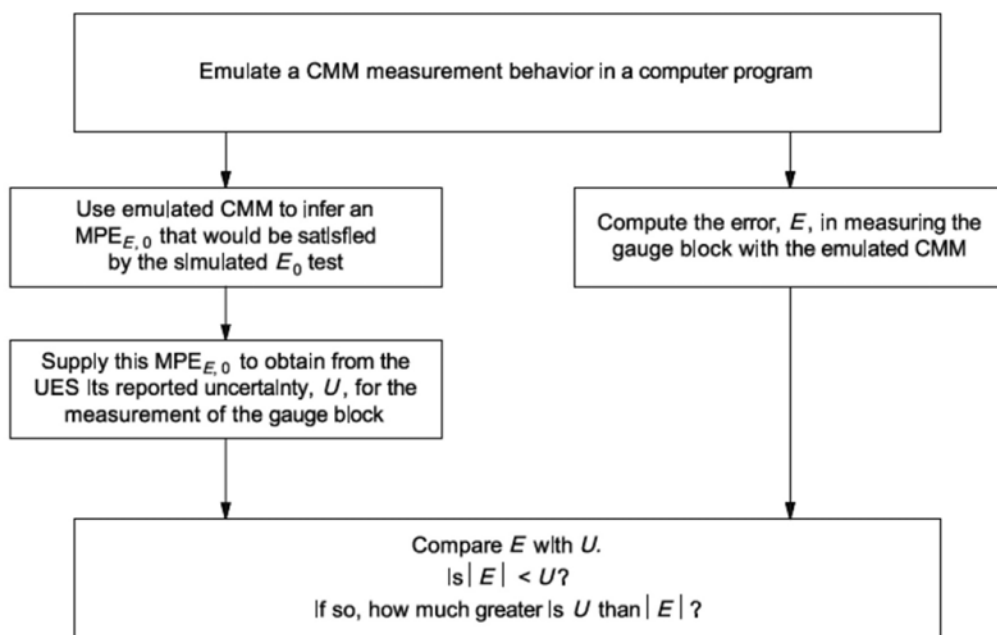


Figura 2.7 Schema del procedimento della tecnica di simulazione considerando come compito la misura un blocchetto di riscontro

### 2.3.2.3 Confronto con risultati di riferimento specifici

Si tratta di un metodo di confronto dell'incertezza segnalata dal software in esame con un risultato di riferimento noto; quest'ultimo ottenuto, ad esempio, da un programma scritto appositamente per riportare l'incertezza in condizioni ristrette, oppure da risultati affidabili pubblicati. In tali condizioni, l'incertezza riportata dall'UES non dovrebbe essere inferiore al valore di riferimento.

Tali confronti però rappresentano operazioni complesse, poiché la valutazione dell'incertezza è legata alle informazioni disponibili. Due valutazioni possono dare incertezze diverse a causa di una raccolta di maggiori informazioni sulla CMM rispetto all'altra. Dal momento che entrambi sono valutazioni corrette dell'incertezza è opportuno prestare molta attenzione nel confrontare i valori.

Il risultato di riferimento deve essere noto a priori per essere corretto e non deve essere più grande del necessario a causa della mancanza di conoscenza; ciò è possibile quando, per esempio, le condizioni sono limitate al punto che un programma di riferimento è abbastanza semplice da essere facilmente verificato.

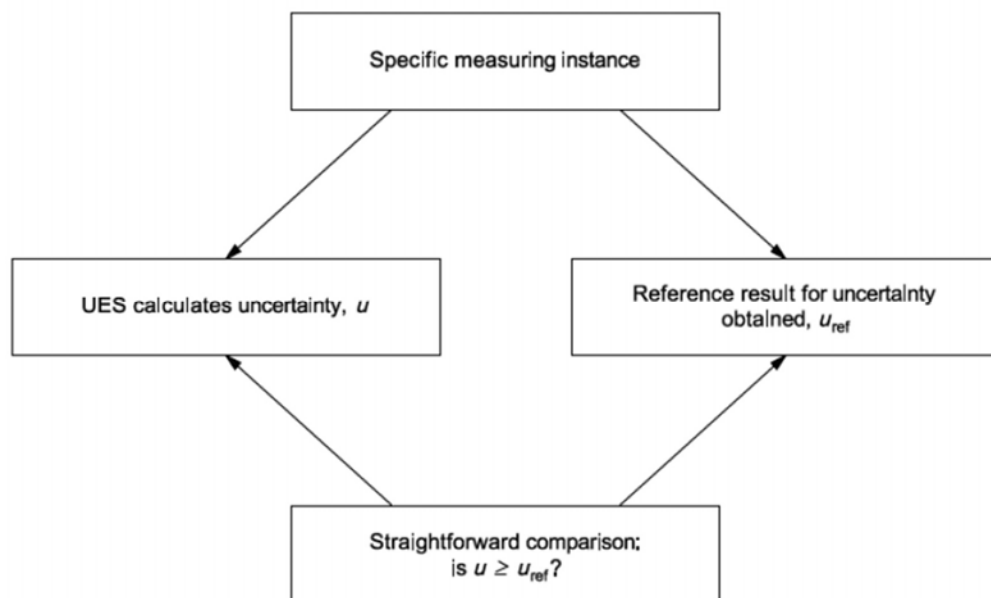


Figura 2.8: Schema dell'applicazione del metodo di confronto con risultati di riferimento

#### 2.3.2.4 Indagini statistiche a lungo termine

Alla base di questo metodo c'è un singolo compito di misura ben definito per il quale è previsto una raccolta di risultati utilizzando un software e variando tempi, CMM e condizioni. La metodologia di questa tecnica è simile a quella riguardante i test fisici, ma consolida i risultati delle misurazioni effettuate in un'ampia gamma di condizioni e probabilmente per un lungo periodo.

Quindi questo metodo, nonostante dipenda parzialmente dai test fisici, include ulteriori vantaggi

È opportuno che l'attività di misurazione sia definita correttamente ed in maniera esaustiva, in modo tale da creare una categoria appropriata per i risultati aggregati e comparativi. Si deve fare attenzione a non presumere automaticamente che il gran numero di misurazioni implichi necessariamente una copertura completa delle condizioni di misurazione.

## **2.4 Considerazioni sulla difficoltà di applicazione della serie ISO 15530**

Come detto precedentemente il calcolo per la stima dell'incertezza di uno specifico compito di misura nasconde delle difficoltà e nonostante i vari metodi esposti finora anch'essi presentano alcune limitazioni di utilizzo.

In alcuni casi è affidata alla valutazione di professionisti ma può risultare così difficile che persino un esperto non può eseguirla.

In questi casi allora, si può ricorrere a *metodi di tipo A* basati sulla conoscenza a posteriori, la cui procedura predefinita permette di fare una valutazione sperimentale senza aver bisogno di una piena comprensione di tutte le fonti di incertezza. Questo può essere accettato quando non vi è un'alternativa più semplice, perché come esposto dalla norma ISO 15530-3 che definisce questo metodo, è richiesta la disponibilità di pezzi tarati simili a quelli su cui deve essere effettuata l'attività di misurazione stabilita. Rappresenta un limite importante all'applicazione del metodo in quanto molto spesso tali pezzi non sono disponibili o difficili da tarare anche per un centro di taratura. Quindi tale metodo sposta semplicemente la valutazione dell'incertezza sulla taratura stessa del pezzo da utilizzare come riferimento.

Mentre per quanto riguarda la parte 4 della serie ISO 15530, basata su *metodi di valutazione di tipo B* sulla conoscenza a priori, si presentano delle difficoltà per ognuna delle tecniche utilizzate.

Di seguito si ricordano i principali svantaggi per i metodi proposti:

- Test fisici su una singola CMM:

prevedono delle misurazioni fisiche lunghe e costose e ne servono svariate per fare dei confronti statistici affidabili, inoltre richiedono molti artefatti tarati. Infine, fare il test su una specifica CMM non garantisce che il software per la valutazione dell'incertezza (UES) funzioni su altre CMM.

- Verifica e valutazione assistita dal calcolatore:

le attività di misurazione simulate al computer non includono tutti gli effetti reali, in quanto questo metodo viene spesso utilizzato per esaminare solo alcuni parametri che vengono quindi isolati.

- Confronto con risultati di riferimento specifici:

il test si può applicare solo a limitate situazioni coperte dal software sottoposto al test a causa della limitata disponibilità di valori di riferimento.

- Indagini statistiche a lungo termine:

potrebbe essere difficile determinare la fonte del problema se i risultati misurati sono statisticamente incoerenti con le incertezze riportate dall'UES a causa delle variazioni consentite da misurazione a misurazione.

Per tutti questi motivi si stanno cercando di sviluppare metodi alternativi per il calcolo dell'incertezza di uno specifico compito di misura, in questo rientra la parte 2 della normativa ISO 15530 che ha come scopo quello di introdurre il metodo delle *multiple measurement strategy* per la valutazione dell'incertezza di misura. Questa parte di normativa è ancora in fase di sviluppo e rappresenta l'oggetto di sperimentazione di questo elaborato.

## Capitolo 3

# Studio della metodologia “multiple measurement strategies” per applicazioni industriali

Come visto in precedenza, in ambito industriale sono ampiamente diffuse le macchine di misura a coordinate CMM, che se da un lato rappresentano strumenti estremamente importanti nelle aziende, presentano delle difficoltà nella valutazione dell'incertezza di misura. Come visto in precedenza, i riferimenti normativi in questo ambito sono estesi e in continuo aggiornamento. La serie EN ISO 15530 [1-4] descrive alcuni metodi per valutare l'incertezza nelle misure a coordinate, mentre la norma EN ISO 14253-1 descrive le regole di decisione per dimostrare la conformità o la non conformità del prodotto alle specifiche, includendo quantitativamente l'incertezza della misurazione. I vari metodi di valutazione dell'incertezza finora esposti sono spesso molto complessi.

L'obiettivo che ci si pone in questo elaborato è di sperimentare un nuovo metodo proposto per la stima dell'incertezza delle misure tramite CMM da poter utilizzare facilmente in ambito industriale. Alla base di questo metodo c'è la tecnica delle *multiple measurement strategies*, ovvero la possibilità di stimare l'incertezza andando a eseguire varie misure in varie orientazioni del pezzo così da poter assumere una ragionevole indipendenza delle misurazioni e tutto ciò porta a randomizzare per quanto possibile gli errori sistematici sconosciuti, in modo da poter applicare una media e una valutazione dell'incertezza basata sulla varianza dei risultati (procedura GUM valutazione di tipo A).

Questo metodo non comporta l'uso di pezzi tarati, che significa anche eliminare tutti i costi legati all'acquisto, taratura e utilizzo di questi oggetti

### **3.1 ISO 15530-2: Tecnica delle multiple measurement strategies**

La tecnica delle *multiple measurement strategies* prevede la misura con una CMM di un pezzo attraverso distribuzioni multiple di punti tastati in diverse orientazioni del pezzo rispetto agli assi della macchina. Rappresenta una parte della norma ISO 15530 che può essere utilizzata per la taratura dei pezzi reali e descrive anche il calcolo dell'incertezza dei risultati di tale misura. Anche

se questa specifica tecnica è stata preparata per le misure con CMM cartesiane, può essere applicabile anche ad altri tipi di sistemi di misura flessibili come bracci articolati e laser tracker.

Nella maggior parte dei casi, errori sistematici sconosciuti dominano l'incertezza di misura nella metrologia a coordinate. Di solito non è possibile scoprire o eliminare questi errori ripetendo misurazioni nella stessa posizione e utilizzando la stessa strategia di sondaggio.

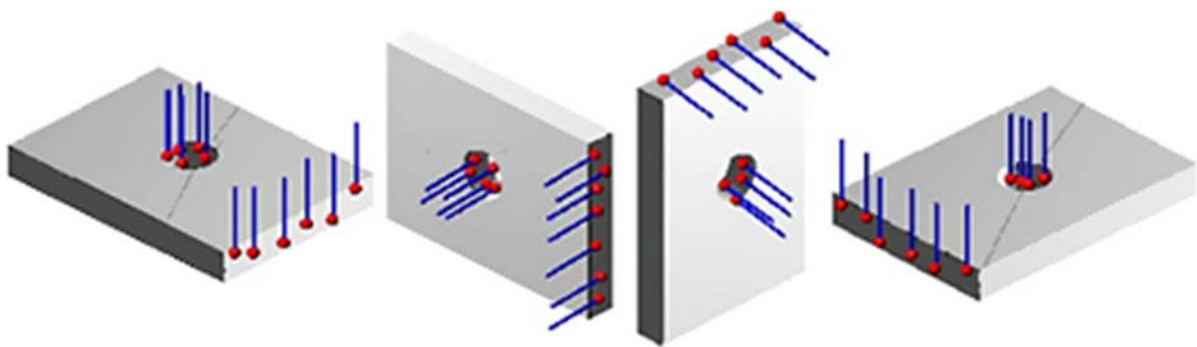


Figura 3.1: Esempio di utilizzo delle multiple measurement strategies

Il principio del metodo proposto è quello di ripetere una misura variandone le condizioni così da poter assumere una ragionevole indipendenza delle misurazioni e tutto ciò porta a randomizzare per quanto possibile gli errori sistematici sconosciuti, in modo da poter applicare una media e una valutazione dell'incertezza basata sulla varianza dei risultati (procedura GUM valutazione di tipo A).

Ciò comporterà una riduzione generale dell'incertezza di misura per le caratteristiche geometriche misurate rispetto a una singola misurazione e la conoscenza dell'incertezza specifica del compito per ciascun misurando; perché quando si utilizza questa procedura, si presuppone che per qualsiasi tipo di caratteristica geometrica (distanza, angolo, ecc.) ci saranno sufficienti orientamenti di artefatti in cui le fonti, per la maggior parte degli errori o delle influenze di incertezza della CMM, sono indipendenti.

I vantaggi di questa tecnica prevedono che non vi sia la necessità di alcun oggetto calibrato simile al pezzo che deve essere misurato, inoltre è possibile che l'incertezza di misura sia sovrastimata perché la disposizione di alcuni pezzi potrebbe non essere "naturale", ma tutto ciò è vantaggio di sicurezza. Per gli utilizzatori della CMM è possibile acquisire informazioni sugli effetti delle diverse strategie di misura che risultano essere utili informazioni sperimentali sulla macchina di misura a coordinate utilizzata, così da poter costruire un database per la valutazione dell'incertezza attraverso giudizio di esperti.

Il principio che sta alla base di questo metodo è quello di isolare, al fine di poterli stimare, due gruppi di contributi di incertezza:

- l'influenza della ripetibilità di una CMM per uno specifico compito di misura, insieme con l'influenza della distribuzione dei punti acquisiti.
- L'influenza degli errori geometrici della CMM unitamente all'effetto del serraggio e del processo di qualifica della sonda

A questi si possono aggiungere altri contributi di incertezza nel caso in cui il misurando sia una distanza, una dimensione o una posizione:

- *errore medio nella misura di distanza:*

È determinato misurando un campione di lunghezza tarata, successivamente tutti i risultati di dimensione, distanza e posizione possono essere corretti.

- *errore medio sul diametro della punta del tastatore:*

È l'errore legato allo scostamento che si verifica nelle misure di *features* geometriche interne ed esterne. La stima della sua entità è ottenuta tramite la misura di campioni tarati, quali anelli e sfere, sui quali si eseguono misure di diametro interno ed esterno.

- *incertezza della correzione termica:*

Questo è riferito alla CMM al pezzo da misurare ed ai campioni tarati. Viene stimata a partire dalla conoscenza del comportamento termico della CMM e dalle condizioni di misura.

La procedura del metodo per essere attuata richiede che siano attivate tutte le funzioni software per la compensazione degli errori (flessione, termica, ecc.), che le caratteristiche oggetto della misura siano misurabili per qualsiasi orientamento del pezzo, che la CMM sia dotata del materiale necessario al fissaggio dei pezzi e che su di essa sia montato un sistema di tastatori che permetta di eseguire le misure in ogni posizione.

Per far sì che siano impiegate sufficienti orientazioni del pezzo e distribuzioni dei punti per rendere le sorgenti degli errori indipendenti, il pezzo viene posizionato di default sulla CMM in quattro diverse orientazioni. Come prima orientazione viene definita una posizione iniziale chiamata *home position*; le altre orientazioni sono ottenute ruotando il manufatto di 90° attorno al primo, al secondo e al terzo asse della CMM dalla *home position* rispettivamente.

## 3.2 Il progetto EUCoM

I metodi attualmente in uso per determinare le incertezze delle misurazioni specifiche per attività sulle macchine di misura a coordinate (CMM) comportano l'esecuzione di misurazioni comparative

che richiedono tempo (ISO 15530-3) o l'utilizzo di una delle tante applicazioni software che consentono l'esecuzione di simulazioni come descritto nella norma ISO 15530-4.

Tuttavia, i metodi attualmente in uso per la valutazione dell'incertezza mancano di un'applicazione pratica per l'uso nell'industria e sono principalmente limitati ai National Metrology Institutes (NMI) e ad alcuni utenti di fascia alta.

È stata individuata in Europa la necessità di sviluppare metodi semplificati e convalidati per prevedere l'incertezza delle misurazioni di coordinate specifiche dell'attività nell'industria, nonché la necessità di sviluppare metodi tracciabili che migliorino la validità dei metodi esistenti. Per rispondere a questa esigenza, numerosi partner europei stanno lavorando all'interno del progetto europeo chiamato EUCoM -Standard for the evaluation of the uncertainty of Coordinate Measurement in industry.

Questo progetto mira a raggiungere una standardizzazione del metodo di valutazione dell'incertezza di misura a coordinate fornendo metodi semplificati basati sulle *multiple measurement strategies* per la valutazione delle incertezze di misurazione, applicabili per l'uso nell'industria e fornendo una guida ai professionisti, per poi validarne la procedura per poter ampliare la ISO 15530 con la parte 2. Ciò consentirà alle aziende di prendere decisioni più affidabili sull'ispezione dei prodotti, riducendo il rischio di falsa accettazione o rifiuto dei componenti.

Il progetto EUCoM prevede, durante i 36 mesi di durata, la collaborazione fra 12 partners principali, coordinati da Alessandro Balsamo: Università degli studi di Padova (ITA), Istituto Nazionale Metrologico italiano (ITA), Cesky Metrologicky Institut (CZE), Teknologisk Institut (DNK), Central Office of Measures (POL), AS Metrosert (EST), NPL Management Limited (UK), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (DEU), Turkiye Bilimsel ve Teknolojik Arastirma Kurumu (TUR), Akademia Techniczno-Humanistyczna W Bielsku-Bialej (POL), Fundacion Tekniker (ESP), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (JPN).

Il piano del progetto EUCoM è suddiviso in 5 Work Packages, in cui sono coinvolti i vari partners:

- Work Package 1: Metodi a posteriori (tipo A)
- Work Package 2: Metodi a priori (tipo B)
- Work Package 3: Validazione sperimentale dei metodi
- Work Package 4: Creare impatto
- Work Package 5: Management e coordinazione

L'università degli studi di Padova collaborerà, con altre università, ai Work Package 1, 3, 4 e 5.

### **3.2.1 Work Package 1: metodi a posteriori (tipo A)**

Lo scopo di questo pacchetto di lavoro è sviluppare un metodo basato su ripetizioni e inversioni di misurazioni del pezzo non **tarato** in fase di misurazione, senza necessità di uno tarato con alla base l'approccio delle *multiple measurement strategies*.

Le possibili funzionalità riscontrate nelle applicazioni pratiche sono suddivise in classi di crescente complessità, ciascuna affrontata in attività separate.

Il WP1 ha come obiettivi delle attività da svolgere:

1. Il Task 1 affronta le dimensioni, gli angoli e le caratteristiche geometriche non correlate ai riferimenti
2. Il Task 2 affronta le caratteristiche geometriche relative ai riferimenti. Queste due attività riguardano il rilevamento puntuale discreto.
3. L'attività 3 si estende al caso della scansione.

Più precisamente

- Task 1 Dimensioni / angolo e caratteristiche geometriche non correlate ai riferimenti:

sondaggio tattile a punti discreti: lo scopo è sviluppare una procedura di valutazione dell'incertezza per le dimensioni, gli angoli e le caratteristiche geometriche non correlati a riferimenti su geometrie prismatiche attraverso una procedura di acquisizione tattile di punti discreti. La procedura è convalidata attraverso esperimenti di simulazione e misurazione.

- Task 2 Funzionalità geometriche relative a riferimenti:

rilevamento di punti discreti tattili: lo scopo è sviluppare una procedura di valutazione dell'incertezza per le caratteristiche geometriche correlate a riferimenti su geometrie prismatiche e di tipo freeform attraverso una procedura di acquisizione tattile di punti discreti. La procedura dovrà essere convalidata attraverso esperimenti di simulazione e misura. Questo task non è stato oggetto di tesi.

- Task 3 caratteristiche geometriche tramite scansione:

lo scopo è sviluppare una procedura di valutazione dell'incertezza per le caratteristiche geometriche su geometrie prismatiche e a forma libera in modalità di scansione tattile. La procedura dovrà essere convalidata tramite simulazione ed esperimenti di misura.

### **3.2.2 Work Package 3: validazione sperimentale dei metodi**

Lo scopo di questo pacchetto di lavoro è verificare i metodi e le procedure a posteriori (sperimentali, di tipo A) e a priori (per giudizio di esperti, di tipo B) sviluppati nel WP1 e WP2.

Saranno condotti dei compiti di verifica riguardanti pezzi prismatici e forme libere. Per ottenere risultati comparabili, sono necessari standard di riferimento con proprietà che si adattano a diverse classi di CMM (ad es. Intervallo di misurazione e precisione) allo scopo di fornire prove sufficienti per sostenere gli standard internazionali.

Le norme di riferimento dovrebbero acquisire quantità fondamentali di forme semplici (norme di riferimento prismatiche) e complicate geometrie a forma libera. Il consorzio comprende partner con esperienza nella realizzazione di misurazioni a coordinate complesse. Il fatto di coinvolgere numerosi partners all'interno del progetto offre un'opportunità per un'ampia convalida: in diversi paesi, con diverse CMM, in diversi ambienti. Nel caso di un risultato positivo della convalida, si tratterebbe di una prova molto forte che i metodi proposti sono abbastanza robusti da essere inseriti negli standard internazionali della serie ISO 15530; in caso contrario, emergerebbero i limiti di validità dei metodi, consentendo una chiara definizione dell'ambito di applicazione degli standard derivati. A differenza dei confronti metrologici convenzionali, questa sperimentazione ha lo scopo di convalidare i metodi piuttosto che le capacità dei partecipanti.

Il WP 3 si suddivide a sua volta in 2 task che devono essere svolti:

- Task 1: Studio di validazione usando standard di riferimento prismatici:

lo scopo è verificare i risultati del WP 1 usando standard prismatici di riferimento.

- Task 2: Studio di verifica usando standard a forma libera:

lo scopo è verificare i risultati del WP 1 usando standard freeform; in aggiunta rispetto agli standard prismatici deve anche essere definito un preciso metodo di misurazione, registrazione dei dati acquisiti e di come metterli in relazione.

### **3.3 Procedura per la valutazione dell'incertezza di misura sviluppata nel progetto EUCoM**

La procedura di valutazione dell'incertezza di misura descritta nel progetto EUCoM è stata sviluppata assumendo che le misure sui vari pezzi vengano eseguite utilizzando macchine di misura a coordinate di tipo cartesiano CMM dotate di sistemi di rilevamento tattile, tuttavia, può essere applicabile anche ad altri tipi di sistemi di misura a coordinate; per la sperimentazione della procedura sono stati presi in considerazione dei pezzi di riferimento stabiliti dal progetto che sono stati fatti circolare tra i vari partner, anche se è possibile iniziare a sperimentare il metodo su pezzi ritenuti ragionevolmente idonei.

La procedura prevede tre step:

1. Misurazioni multiple sul pezzo in esame:

vengono eseguite la ripetizione delle misurazioni in più orientamenti dell'artefatto con una distribuzione identica dei punti di sondaggio.

2. Misurazioni di campione di lunghezza:

vengono eseguite in tre direzioni reciprocamente perpendicolari tra loro tipicamente nelle direzioni degli assi X, Y e Z delle coordinate della macchina sul CMM da utilizzare

3. Misurazioni per la verifica del tastatore:

vengono effettuate utilizzando una sfera di prova tarata posizionata nello stesso volume di misura in cui vengono fatte le misure del pezzo in esame.

Di seguito sono riportate in dettaglio gli step della procedura.

### **3.3.1 Misurazioni multiple sul pezzo in esame**

Seguendo la teoria delle *multiple measurement strategies*, l'oggetto di cui si vuole valutare l'incertezza di misura viene posizionato sulla CMM in quattro orientamenti diversi per ridurre l'incertezza della misurazione.

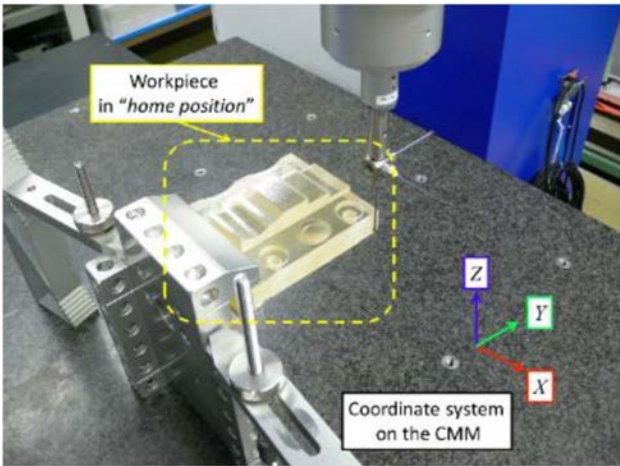
Come prima orientazione viene definita una posizione iniziale chiamata *home position*.

Le altre posizioni sono orientamenti ottenuti ruotando il pezzo di 90° rispetto al primo, al secondo e terzo asse del CMM dalla posizione iniziale.

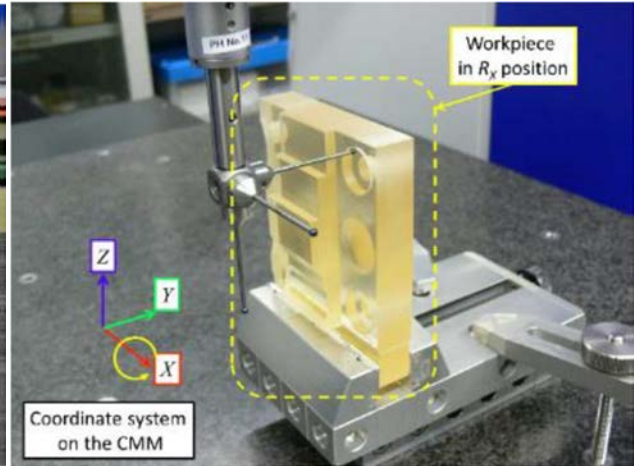
Le misurazioni sul manufatto nelle rispettive posizioni vengono eseguite con una distribuzione identica dei punti misurati, ovvero la posizione nominale e il numero dei punti misurati per l'acquisizione (nel rispetto della serie ISO 14406) è lo stesso per ogni misurazione. Devono essere registrate le informazioni sulla distribuzione dei punti di misurazione applicati per la calibrazione.

Con la distribuzione identica dei punti di misurazione, le ripetizioni delle misure vengono eseguite nei rispettivi orientamenti per almeno tre volte come predefinito.

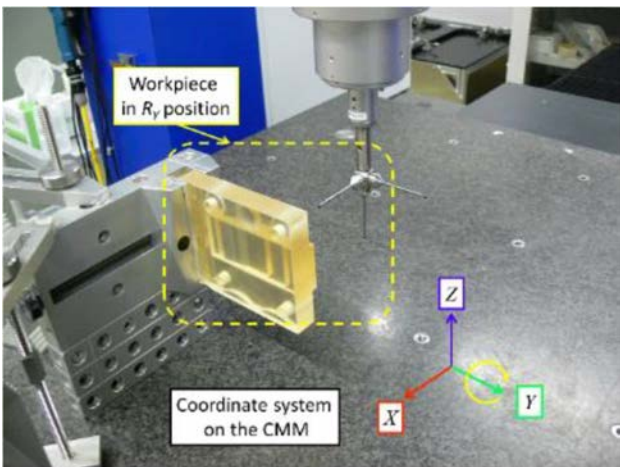
Quando è noto a priori che la ripetibilità della misurazione della CMM da utilizzare è notevolmente elevata, il numero di ripetizioni deve essere maggiore del numero predefinito per motivi statistici.



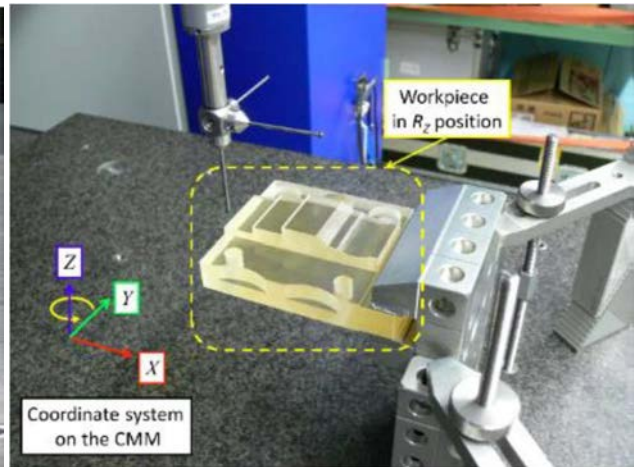
a) Homeposition



b) rotazione di 90° rispetto all'asse x della CMM



c) rotazione di 90° rispetto all'asse y della CMM



b) rotazione di 90° rispetto all'asse z della CMM

Figura 3.2: posizioni del pezzo in quattro orientamenti per la misurazione

Nella tabella come quella riportata in Fig. 3.3 si raccolgono i risultati delle misure fatte sul pezzo di riferimento in cui valore misurato viene indicato con  $^i y_j$  dove  $i = 1 \dots n_1$  indica il ciclo di misura a cui fa riferimento il dato e  $j = 1 \dots n_2$  indica l'orientazione del pezzo a cui fa riferimento il dato.

	Orientation 1 (home position)	Orientation 2 ( $R_x$ position)	Orientation 3 ( $R_y$ position)	Orientation 4 ( $R_z$ position)
Cycle 1	$11y$	$12y$	$13y$	$14y$
Cycle 2	$21y$	$22y$	$23y$	$24y$
Cycle 3	$31y$	$32y$	$33y$	$34y$

Figura 3.3: Tabella per la raccolta delle misure sul pezzo di riferimento

### 3.3.2 Misure su un campione di lunghezza

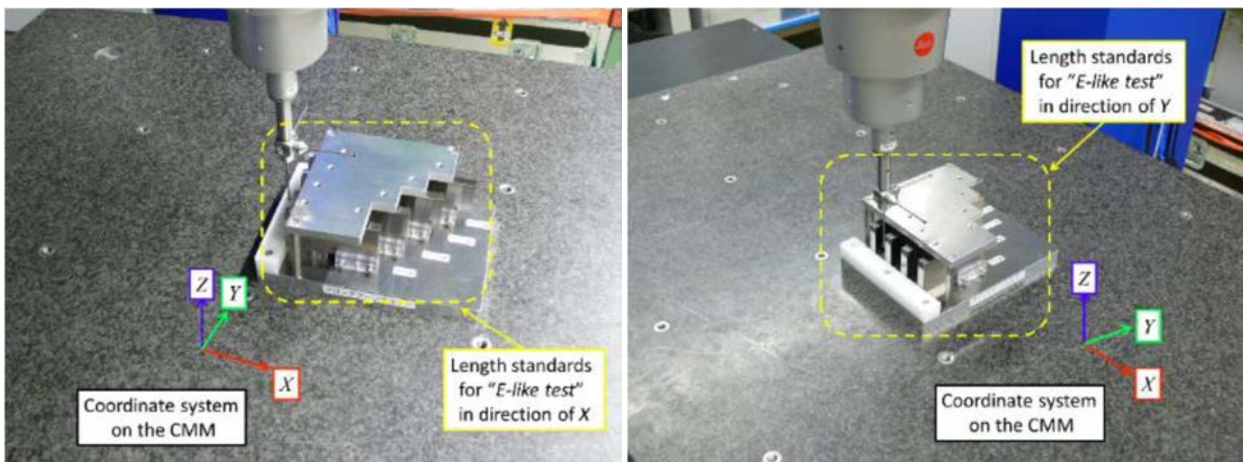
Il campione di lunghezza viene misurato all'interno dello stesso volume della CMM in cui viene misurato il pezzo reale. Le misurazioni dello standard di lunghezza vengono eseguite in almeno tre orientazioni reciprocamente ortogonali.

I risultati delle misurazioni del campione di lunghezza vengono utilizzati per due scopi:

- compensazione dell'errore di scala della CMM nella regione in cui vengono eseguite le misure sul pezzo
- valutazione dell'incertezza di misura derivata da tale errore di scala. Idealmente, i valori degli errori di scala dovrebbero essere rilevati senza l'influenza di errori di tastatura.

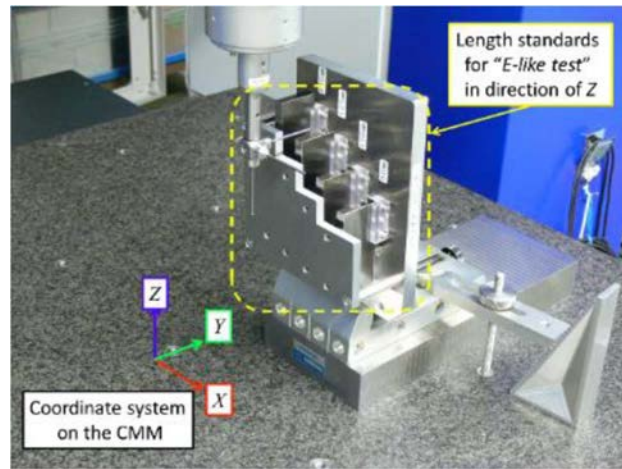
Pertanto, si raccomanda di eseguire la misurazione degli standard di lunghezza con modalità di misurazione unidirezionale. In ciascun orientamento, il campione di lunghezza viene misurato almeno tre volte. Quando è noto a priori che la ripetibilità della misurazione della CMM da utilizzare è notevolmente elevata, il numero di ripetizioni deve essere maggiore del numero predefinito per motivi statistici.

La Figura 3.4 mostra un esempio di impostazione della misurazione degli standard di lunghezza sulla CMM.



a) X axis direction

b) Y axis direction



c) Z axis direction

Figura 3.4: impostazione della misurazione dello standard di lunghezza in tre direzioni

I risultati delle misure del campione di lunghezza vengono raccolti in una tabella come quella sotto riportata in Figura 3.5, in cui valore misurato viene indicato con  ${}^{ij}L_{measstd}$  dove  $i = 1...n_3$  indica il ciclo di misura a cui fa riferimento il dato e  $j = 1...n_4$  indica l'orientazione del pezzo a cui fa riferimento il dato.

	Orientation 1 (X axis direction)	Orientation 2 (Y axis direction)	Orientation 3 (Z axis direction)
Cycle 1	${}^{11}L_{measstd}$	${}^{12}L_{measstd}$	${}^{13}L_{measstd}$
Cycle 2	${}^{21}L_{measstd}$	${}^{22}L_{measstd}$	${}^{23}L_{measstd}$
Cycle 3	${}^{31}L_{measstd}$	${}^{32}L_{measstd}$	${}^{33}L_{measstd}$

Figura 3.5: Tabella per la raccolta dei risultati su campione di lunghezza

Attraverso le misure acquisite sullo standard di lunghezza, si esegue il calcolo dell'errore medio di scala  $E_L$  nella regione d'interesse della macchina, usando la seguente formula:

$$E_L = \frac{1}{(n_3 * n_4)} \sum_{j=1}^{n_4} \sum_{i=1}^{n_3} (ij L_{measstd} - L_{calstd})$$

$L_{calstd}$  è il valore calibrato dello standard di lunghezza (reperibile sul certificato di taratura).

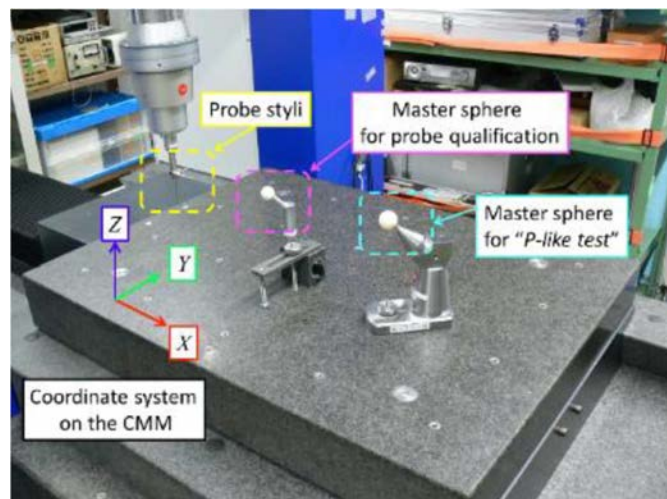
### 3.3.3 Misure per la verifica del tastatore

Il campione utilizzato per la verifica del tastatore è una sfera master diversa da quella utilizzata per la qualifica del tastatore, che deve essere all'interno dello stesso volume della CMM in cui viene misurato il pezzo.

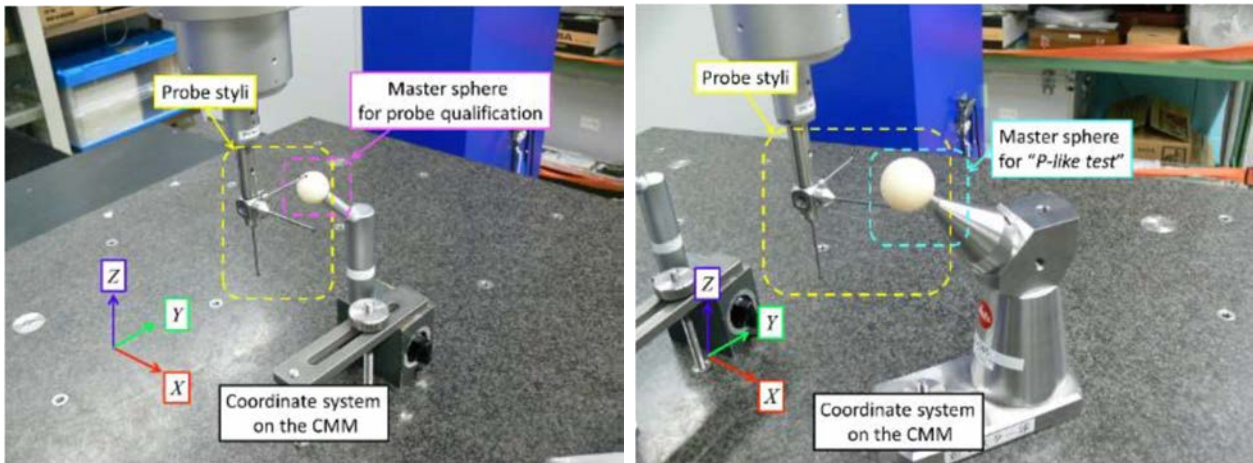
I risultati delle misurazioni del campione sono utilizzati per due scopi:

- compensazione dell'errore dimensionale di tastatura della CMM
- valutazione dell'incertezza derivata dal sistema sondaggio

Utilizzando ogni tastatore viene misurata almeno tre volte la sfera di riferimento utilizzando la stessa distribuzione di punti che prevede 25 punti predefiniti equamente distribuiti sulla superficie accessibile della sfera master.



a) Setup of material standards for probe qualification and verification



b) Probe qualification

c) Probe verification

Figura 3.6: impostazione della misurazione del campione per la qualifica e la verifica del tastatore

I risultati delle misure della sfera di riferimento vengono raccolti in una tabella come quella riportata di seguito, il cui valore misurato viene indicato con  ${}^{ij}D_{measstd}$  dove  $i = 1 \dots n_5$  indica il ciclo di misura a cui fa riferimento il dato e  $j = 1 \dots n_6$  indica il tastatore con cui è stato acquisito il dato. Inoltre, per ogni ciclo si acquisisce anche il valore del diametro  ${}^iD_{MCS}$  della sfera minima circoscritta che comprende i centri delle sfere derivanti dalle acquisizioni nelle varie orientazioni con il rispettivo tastatore.

	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Centre
Cycle 1	${}^{11}D_{measstd}$	${}^{12}D_{measstd}$	${}^{13}D_{measstd}$	${}^1D_{MCS}$
Cycle 2	${}^{21}D_{measstd}$	${}^{22}D_{measstd}$	${}^{23}D_{measstd}$	${}^2D_{MCS}$
Cycle 3	${}^{31}D_{measstd}$	${}^{32}D_{measstd}$	${}^{33}D_{measstd}$	${}^3D_{MCS}$

Figura 3.7: Tabella per la raccolta delle misure sulla sfera standard

Quando si sono acquisite le misure sulla sfera master, si esegue il calcolo dell'errore di qualifica della dimensione del tastatore  $E_D$  usando la seguente formula:

$$E_D = \frac{1}{n_5 * n_6} \sum_{j=1}^{n_5} \sum_{i=1}^{n_6} ({}^{ij}D_{measstd} - D_{calstd})$$

$D_{measstd}$  è il valore calibrato dello standard usato per la qualifica del tastatore (reperibile sul certificato di taratura).

Con i valori dei diametri della sfera minima circoscritta che comprende i centri delle sfere derivanti dalle acquisizioni dei punti misurati con il rispettivo tastatore in tutte le ripetizioni si calcola l'errore medio di qualifica della posizione del tastatore  $E_{PrbLoc}$  usando la seguente formula:

$$E_{PrbLoc} = \frac{1}{n_5} \sum_{i=1}^{n_5} D_{MCS}$$

### 3.3.4 Valutazione dell'incertezza di misura

L'incertezza di misura del pezzo viene calcolata nel seguente modo:

$$U = k * \sqrt{|E_L|^2 + |E_D|^2 + |E_{PrbLoc}|^2 + \frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_{geo*dist}^2 + u_L^2 + u_D^2 + u_{PrbLoc}^2 + u_{temp}^2}$$

- U incertezza estesa del risultato finale corretto della misura
- k coverage factor (solitamente si assume k = 2 corrispondente ad una probabilità di circa il 95%)
- $E_L$  errore medio di scala della CMM nella regione d'interesse
- $E_D$  errore medio di qualifica delle dimensioni del tastatore
- $E_{PrbLo}$  errore medio di qualifica della posizione del tastatore
- $u_{rep}$  contributo di incertezza tipo derivante dalla ripetibilità della CMM
- $u_{geo}$  contributo di incertezza tipo derivante dagli errori della geometria della CMM
- $u_{geo*dist}$  contributo di incertezza tipo derivante dall'interazione tra l'errore della geometria della CMM e la distribuzione di punti di misurazione acquisiti sulla specifica feature del pezzo
- $u_L$  contributo di incertezza tipo derivante dall'errore di scala
- $u_D$  contributo di incertezza tipo derivante dall'errore dimensionale del tastatore

- $u_{PrbLoc}$  contributo di incertezza tipo derivante dalla posizione del tastatore
- $u_{temp}$  contributo di incertezza tipo derivante dagli effetti legati alla temperatura

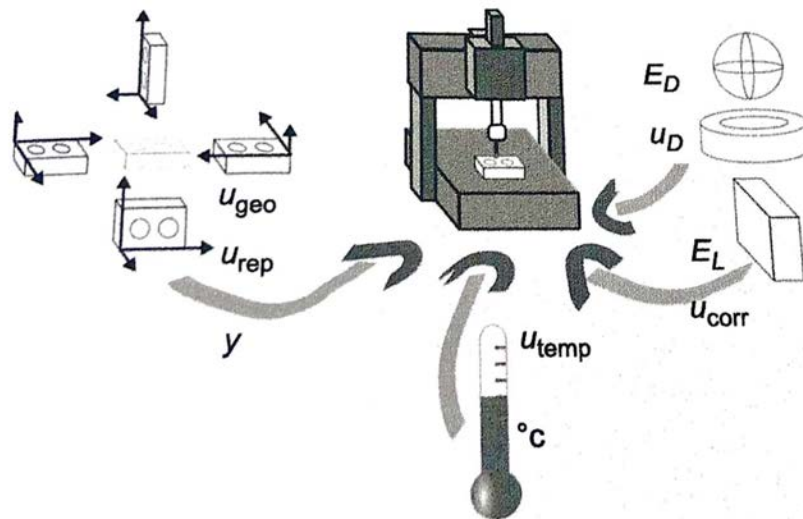


Figura 3.8: Contributi di incertezza di misure a coordinate

È importante fare una precisazione per quanto riguarda i termini  $E_L$  e/o  $E_D$  che devono essere inseriti nella formula solo nel caso in cui le misure delle varie *features* del pezzo non siano già state corrette da tali errori. Nel caso in cui si voglia correggere le misure, si segua la seguente tabella:

feature	Misura corretta
Angolo	$y$
Distanza angolare	$y$
Raggio esterno	$y - E_L - \frac{E_D}{2}$
Raggio interno	$y - E_L + \frac{E_D}{2}$
Lunghezza esterna	$y - E_L - E_D$
Lunghezza interna	$y - E_L + E_D$
Deviazione dell'elemento CAD Caratteristiche geometriche correlate a riferimenti Features di profilo sia su pezzi prismatici che freeform	$y - E_L$
Deviazione da un elemento fittato ai minimi quadrati Caratteristiche geometriche non correlate a riferimenti	$y$

$E_{PrbLoc}$  e  $u_{PrbLoc}$  devono essere inseriti nella formula solo nei casi in cui gli elementi vengano

misurati utilizzando più di un tastatore in una medesima orientazione; qualora venga utilizzato un singolo tastatore alla volta, i due contributi devono essere trascurati.

$u_{geo*dist}$  viene aggiunto alla formula solo in caso di valutazione dell'incertezza per la misurazione della deviazione dagli elementi CAD o dagli elementi fittati ai minimi quadrati.

### 3.3.5 Calcolo dei contributi di incertezza tipo

Nella formula del calcolo dell'incertezza compaiono i contributi di incertezza tipo ( $u_{rep}^2, u_{geo}^2, u_{geo*dist}^2, u_L^2, u_D^2, u_{PrbLoc}^2, u_{temp}^2$ ) che sono valutati con il metodo ANOVA (*Analysis of Variance*), secondo il quale si utilizzano un insieme di tecniche statistiche facenti parte della statistica interferenziale che permettono di confrontare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità interna a ciascun gruppo con la variabilità tra i gruppi. L'ipotesi nulla solitamente prevede che i dati di tutti i gruppi abbiano la stessa origine, ovvero la stessa distribuzione stocastica, e che le differenze osservate tra i gruppi siano aleatorie, cioè dovute solo al caso.

#### 3.3.5.1 Valutazione dei contributi $u_{rep}, u_{geo}$

Sono illustrati nella tabella ANOVA seguente

S	DOF	Variance	Expectation of the variance
$S_A = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (\bar{J}_y - \bar{y})^2$	$f_A = n_2 - 1$	$V_A = S_A / f_A$	$u_{rep}^2 + n_1 \cdot u_{geo}^2$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (ij_y - \bar{J}_y)^2$	$f_e = (n_1 - 1) \cdot n_2$	$V_e = S_e / f_e$	$u_{rep}^2$
$S = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (ij_y - \bar{y})^2$	$f = n_1 \cdot n_2 - 1$		

- $\bar{J}_y$  è il valore medio delle misure nella singola orientazione j-esima
- $\bar{y}$  è il valore medio di tutte le misure
- $ij_y$  è il valore della singola misura
- $n_1$  è il numero dei cicli di misura effettuati
- $n_2$  è il numero delle orientazioni

da cui si ottiene:

$$u_{rep}^2 = V_e$$
$$u_{geo}^2 = (V_a - V_e)/n_1$$

A titolo di esempio viene riportato il caso che mostra la valutazione dell'incertezza per la misurazione della dimensione dell'angolo tra due piani. Entrambi i piani associati alla dimensione dell'angolo vengono misurati con il singolo stilo nei rispettivi orientamenti.

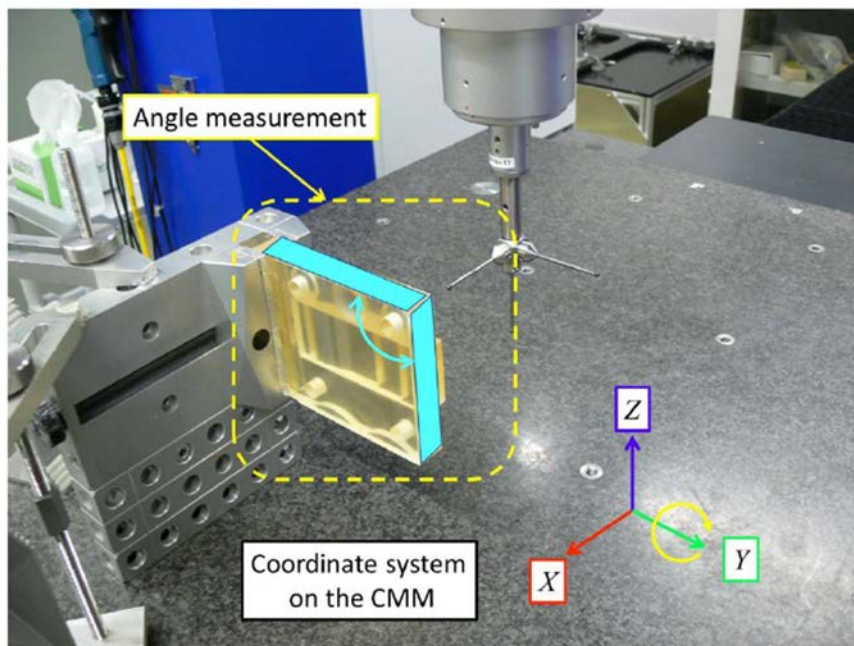


Figura 3.9: *misurazione della dimensione dell'angolo tra due piani in posizione  $R_y$ .*

	Orientation 1 (home position)	Orientation 2 ( $R_X$ position)	Orientation 3 ( $R_Y$ position)	Orientation 4 ( $R_Z$ position)
Cycle 1	90.0033	90.0039	90.0033	89.9964
Cycle 2	90.0033	90.0040	90.0035	89.9963
Cycle 3	89.9967	90.0040	90.0036	89.9963
$\overline{T}_y$	90.0011	90.0040	90.0035	89.9963
$\overline{y}$	90.0012			
S	DOF		Variance	Expectation of the variance
$S_A = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (\overline{T}_y - \overline{y})^2 = 0.000110$	$f_A = n_2 - 1 = 3$		$V_A = S_A / f_A = 0.000037$	$u_{rep}^2 + n_1 \cdot u_{geo}^2 = u_{rep}^2 + 3u_{geo}^2$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (i^j y - \overline{T}_y)^2 = 0.000029$	$f_e = (n_1 - 1) \cdot n_2 = 8$		$V_e = S_e / f_e = 0.000004$	$u_{rep}^2$
$S = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (i^j y - \overline{y})^2 = 0.000139$	$f = n_1 \cdot n_2 - 1 = 11$			
$u_{rep}^2 = V_e = 0.000004$				
$u_{geo}^2 = (V_A - V_e) / n_1 = 0.000011$				
$U = k \cdot \sqrt{\frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2}} = 3 \sqrt{\frac{0.000004}{3} + \frac{0.000011}{4}} = 0.0060$				

Figura 3.10: Tabella per la raccolta delle misure dell'angolo tra due piani e calcolo dei contributi  $u_{rep}$ ,  $u_{geo}$  e dell'incertezza  $U$

### 3.3.5.2 Valutazione del contributo $u_L$

Il contributo di incertezza tipo derivante dall'errore di scala viene calcolato con la seguente formula:

$$u_L^2 = \left( \frac{U_{calstd,L}}{2} \right)^2 + \frac{u_{measstd,L,rep}^2}{n_3} + \frac{u_{measstd,L,geo}^2}{n_4}$$

- $U_{calstd,L}$  è il valore dell'incertezza estesa di taratura del campione di lunghezza, reperibile sul certificato di calibrazione dello standard stesso.
- $u_{measstd,L,rep}$  e  $u_{measstd,L,geo}$  vengono valutate attraverso la seguente tabella ANOVA:

S	GDL	Varianza	Aspettativa della varianza
$S_A = \sum_{j=1}^{n_4} (\overline{jL_{measstd}} - \tilde{L}_{measstd})^2$	$f_A = n_4 - 1$	$V_A = S_A / f_A$	$u_{measstd,L,rep}^2 + n_3 \cdot u_{measstd,L,geo}^2$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_4} (ijL_{measstd} - \overline{jL_{measstd}})^2$	$f_e = (n_3 - 1) \cdot n_4$	$V_e = S_e / f_e$	$u_{measstd,L,rep}^2$
$S = \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_4} (ijL_{measstd} - \tilde{L}_{measstd})^2$	$f = n_3 \cdot n_4 - 1$		

$\overline{jL_{measstd}}$  valore medio delle misure del campione di lunghezza nella singola orientazione j-esima

$\tilde{L}_{measstd}$  valore medio di tutte le misure fatte sul campione di lunghezza

$ijL_{measstd}$  valore della singola misura del campione di lunghezza

$n_3$  numero dei cicli di misura effettuati

$n_4$  numero delle orientazioni

Ottengo:

$$u_{measstd,L,rep}^2 = V_e$$

$$u_{measstd,L,geo}^2 = (V_A - V_e) / n_3$$

Di seguito è riportato un esempio di calcolo del contributo  $u_L$

	Orientation 1 (X axis direction)	Orientation 2 (Y axis direction)	Orientation 3 (Z axis direction)
Cycle 1	100.0019	100.0020	100.0008
Cycle 2	100.0016	100.0009	100.0010
Cycle 3	100.0020	100.0010	100.0012
$\overline{^j L_{measstd}}$	100.0018	100.0013	100.0010
$\overline{\overline{L_{measstd}}}$	100.0014		
$L_{calstd}$	100.0014		
$E_L$	0.0000		
$U_{calstd,L}$	0.0004		
S	DOF	Variance	Expectation of the variance
$S_A$ $= \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_4} \left( \overline{^j L_{measstd}} - \overline{\overline{L_{measstd}}} \right)^2$ $= 0.0000011$	$f_A = n_4 - 1 = 2$	$V_A = S_A / f_A$ $= 0.0000005$	$u_{measstd,L,rep}^2 + n_3 \cdot u_{measstd,L,geo}^2$
$S_e$ $= \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_4} \left( {}^{ij} L_{measstd} - \overline{^j L_{measstd}} \right)^2$ $= 0.0000009$	$f_e = (n_3 - 1) \cdot n_4$ $= 6$	$V_e = S_e / f_e$ $= 0.0000002$	$u_{measstd,L,rep}^2$
$S$ $= \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_4} \left( {}^{ij} L_{measstd} - \overline{\overline{L_{measstd}}} \right)^2$ $= 0.0000020$	$f = n_3 \cdot n_4 - 1 = 8$		
$u_{measstd,L,rep}^2 = V_e = 0.0000002$			
$u_{measstd,L,geo}^2 = (V_A - V_e) / n_3 = 0.0000001$			
$u_L^2 = \left( \frac{U_{calstd,L}}{2} \right)^2 + \frac{u_{measstd,L,rep}^2}{n_3} + \frac{u_{measstd,L,geo}^2}{n_4} = \left( \frac{0.0004}{2} \right)^2 + \frac{0.0000002}{3} + \frac{0.000001}{3}$ $= 0.0000001$			

Figura 3.11: Tabella per la raccolta delle misure ed esempio di calcolo del contributo  $u_L$

A titolo di esempio viene riportato il caso che mostra la valutazione dell'incertezza per la misurazione della distanza tra i centri di due cilindri interni. I cilindri sono misurati con il singolo stilo nei rispettivi orientamenti, trascurando l'effetto della temperatura.

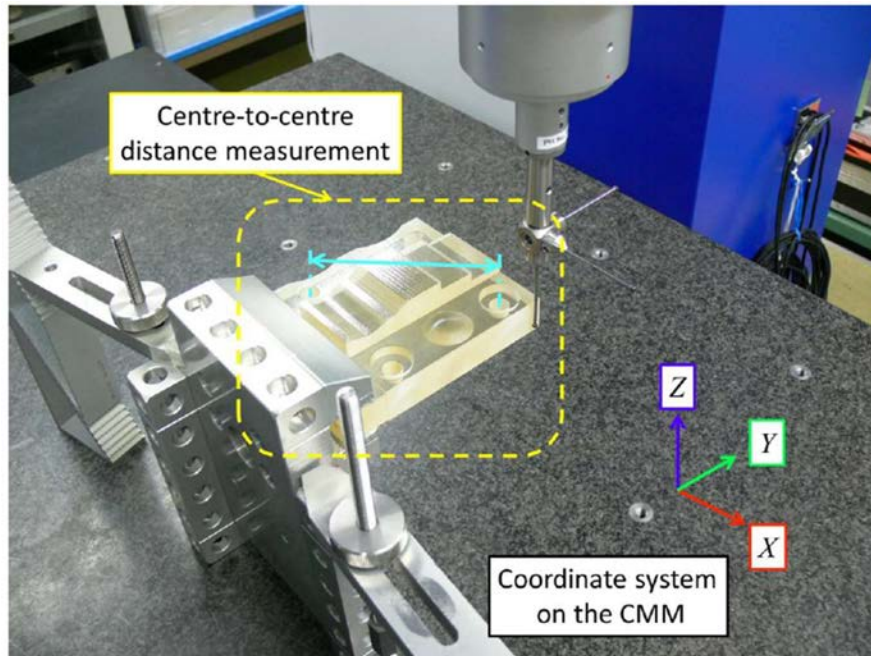


Figura 3.12: misurazione della distanza tra i centri di due cilindri nella posizione di home position

	Orientation 1 (home position)	Orientation 2 ( $R_X$ position)	Orientation 3 ( $R_Y$ position)	Orientation 4 ( $R_Z$ position)
Cycle 1	98.9892	98.9891	98.9894	98.9898
Cycle 2	98.9889	98.9889	98.9891	98.9896
Cycle 3	98.9890	98.9889	98.9891	98.9895
$\overline{\mathcal{T}}_y$	98.9890	98.9890	98.9892	98.9896
$\bar{y}$	98.9892			
S	DOF		Variance	Expectation of Variance
$S_A = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (\overline{\mathcal{T}}_y - \bar{y})^2$ $= 0.0000007$	$f_A = n_2 - 1 = 3$		$V_A = S_A / f_A$ $= 0.0000002$	$u_{rep}^2 + n_1 \cdot u_{geo}^2$ $= u_{rep}^2 + 3u_{geo}^2$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (ijy - \overline{\mathcal{T}}_y)^2$ $= 0.0000002$	$f_e$ $= (n_1 - 1) \cdot n_2$ $= 8$		$V_e = S_e / f_e$ $= 0.0000000$	$u_{rep}^2$
$S = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (ijy - \bar{y})^2 = 0.0000009$	$f = n_1 \cdot n_2 - 1$ $= 11$			
$u_{rep}^2 = V_e = 0.0000000$				
$u_{geo}^2 = (V_A - V_e) / n_1 = 0.0000001$				
$U = k \cdot \sqrt{ E_L ^2 + \frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2}$ $= 3 \sqrt{0.0000000 + \frac{0.0000000}{3} + \frac{0.0000001}{4} + 0.0000001} = 0.0012$ <p>for the calibration value without scale error compensation, <math>\bar{y}</math>, or,</p> $U = k \cdot \sqrt{\frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2}$ $= 3 \sqrt{\frac{0.0000000}{3} + \frac{0.0000001}{4} + 0.0000001} = 0.0012$ <p>for the calibration value with scale error compensation, <math>\bar{y} - E_L</math>.</p>				

Figura 3.12: Tabella per la raccolta delle misure della distanza tra i centri di due cilindri e calcolo dell'incertezza  $U$

### 3.3.5.3 Valutazione del contributo $u_D$

Il contributo di incertezza tipo derivante dall'errore medio di qualifica delle dimensioni del tastatore viene calcolato con la seguente formula:

$$u_D^2 = \left( \frac{U_{calstd,D}}{2} \right)^2 + \frac{u_{measstd,D,rep}^2}{n_5} + \frac{u_{measstd,D,geo}^2}{n_6}$$

dove  $U_{calstd,D}$  è il valore dell'incertezza estesa di taratura del diametro della sfera campione, reperibile sul certificato di calibrazione della sfera stessa; mentre  $u_{measstd,D,rep}$  e  $u_{measstd,D,geo}$  vengono valutate attraverso la seguente tabella ANOVA:

S	GDL	Varianza	Aspettativa della varianza
$S_A = \sum_{j=1}^{n_6} (\overline{jD_{measstd}} - \widetilde{D_{measstd}})^2$	$f_A = n_6 - 1$	$V_A = S_A / f_A$	$u_{measstd,D,rep}^2 + n_5 \cdot u_{measstd,D,geo}^2$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_5} \sum_{j=1}^{n_6} ({}^{ij}D_{measstd} - \overline{jD_{measstd}})^2$	$f_e = (n_5 - 1) \cdot n_6$	$V_e = S_e / f_e$	$u_{measstd,D,rep}^2$
$S = \sum_{i=1}^{n_5} \sum_{j=1}^{n_6} ({}^{ij}D_{measstd} - \widetilde{D_{measstd}})^2$	$f = n_5 \cdot n_6 - 1$		

- $\overline{jD_{measstd}}$  è il valore medio delle misure fatte sul diametro della sfera campione nella singola orientazione j-esima
- $\widetilde{D_{measstd}}$  è il valore medio di tutte le misure fatte sul diametro della sfera campione
- ${}^{ij}D_{measstd}$  è il valore della singola misura del diametro della sfera campione
- $n_5$  è il numero dei cicli di misura effettuati
- $n_6$  è il numero delle orientazioni

da cui si ottiene:

$$u_{measstd,D,rep}^2 = V_e$$

$$u_{measstd,D,geo}^2 = (V_A - V_e) / n_5$$

Esempio di valutazione del contributo di incertezza tipo derivante dall'errore dimensionale del tastatore  $u_D$  e dell'errore medio di qualifica delle dimensioni del tastatore  $E_D$

	Probe 1	Probe 2	Probe 3
Cycle 1	29.9869	29.9861	29.9865
Cycle 2	29.9868	29.9860	29.9866
Cycle 3	29.9868	29.9861	29.9865
$\overline{D_{measstd}}$	29.9868	29.9861	29.9865
$\overline{\overline{D_{measstd}}}$	29.9865		
$D_{calstd}$	29.98629		
$E_D$	0.0002		

$U_{calstd,D}$	0.00015		
S	DOF	Variance	Expectation of Variance
$S_A = \sum_{i=1}^{n_5} \sum_{j=1}^{n_6} \left( \overline{D_{measstd}^{(ij)}} - \overline{\overline{D_{measstd}}} \right)^2$ $= 0.0000008$	$f_A = n_6 - 1 = 2$	$V_A = S_A / f_A = 0.0000004$	$u_{measstd,D,rep}^2 + n_5 \cdot u_{measstd,D,geo}^2$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_5} \sum_{j=1}^{n_6} \left( D_{measstd}^{(ij)} - \overline{D_{measstd}^{(i)}} \right)^2$ $= 0.0000000$	$f_e = (n_5 - 1) \cdot n_6 = 6$	$V_e = S_e / f_e = 0.0000000$	$u_{measstd,D,rep}^2$
$S = \sum_{i=1}^{n_5} \sum_{j=1}^{n_6} \left( D_{measstd}^{(ij)} - \overline{\overline{D_{measstd}}} \right)^2$ $= 0.0000008$	$f = n_5 \cdot n_6 - 1 = 8$		
$u_{measstd,D,rep}^2 = V_e = 0.0000000$			
$u_{measstd,D,geo}^2 = (V_A - V_e) / n_5 = 0.0000001$			
$u_D^2 = \left( \frac{U_{calstd,D}}{2} \right)^2 + \frac{u_{measstd,D,rep}^2}{n_5} + \frac{u_{measstd,D,geo}^2}{n_6}$ $= \left( \frac{0.00015}{2} \right)^2 + \frac{0.0000000}{3} + \frac{0.0000001}{3} = 0.0000001$			

Figura 3.13: Esempio di calcolo del contributo  $u_D$

A titolo di esempio viene riportato il caso che mostra la valutazione dell'incertezza per la misurazione del diametro interno di un cilindro. I cilindri sono misurati con il singolo stilo nei rispettivi orientamenti, trascurando l'effetto della temperatura.

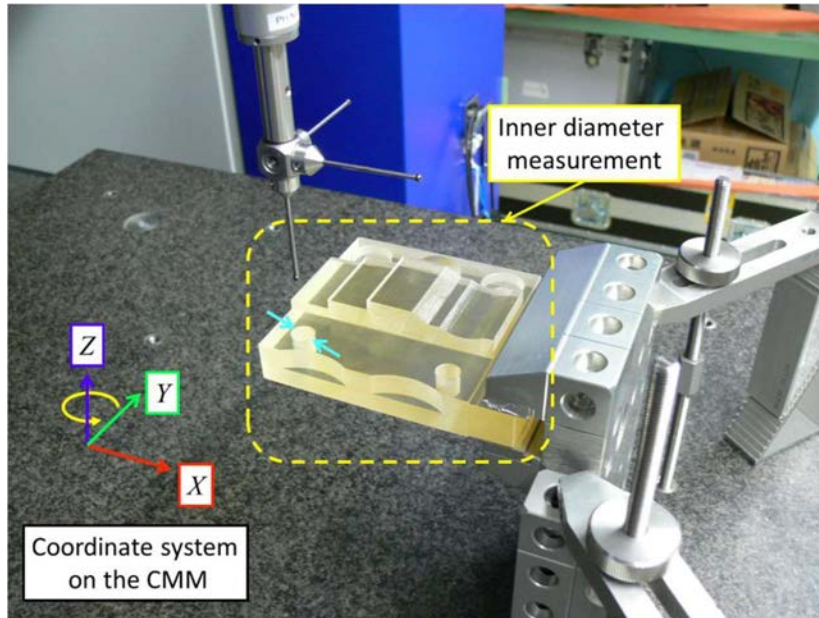


Figura 3.14: misurazione del diametro interno di un cilindro in posizione Rz

	Orientation 1 (home position)	Orientation 2 (R <sub>y</sub> position)	Orientation 3 (R <sub>y</sub> position)	Orientation 4 (R <sub>z</sub> position)
Cycle 1	10.1759	10.1766	10.1787	10.1741
Cycle 2	10.1767	10.1770	10.1794	10.1751
Cycle 3	10.1770	10.1767	10.1794	10.1756
$\overline{J}_y$	10.1765	10.1768	10.1792	10.1749
$\overline{y}$	10.1769			
S	DOF	Variance	Expectation of Variance	
$S_A = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (\overline{J}_y - \overline{y})^2$ $= 0.0000274$	$f_A = n_2 - 1 = 3$	$V_A = S_A / f_A$ $= 0.0000091$	$u_{rep}^2 + n_1 \cdot u_{geo}^2$ $= u_{rep}^2 + 3u_{geo}^2$	
$S_e = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (i_j y - \overline{J}_y)^2$ $= 0.0000022$	$f_e$ $= (n_1 - 1) \cdot n_2$ $= 8$	$V_e = S_e / f_e$ $= 0.0000003$	$u_{rep}^2$	

$S = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} (ijy - \bar{y})^2 = 0.0000297$	$f = n_1 \cdot n_2 - 1 = 11$		
$u_{rep}^2 = V_e = 0.0000003$			
$u_{geo}^2 = (V_A - V_e)/n_1 = 0.0000030$			
$U = k \cdot \sqrt{ E_L ^2 +  E_D ^2 + \frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2 + u_D^2 + u_{temp}^2}$ $= 3 \sqrt{0.0000000 + 0.0000006 + \frac{0.0000003}{3} + \frac{0.0000030}{4} + 0.0000001 + 0.0000003}$ $= 0.0042$			
<p>for the calibration value without neither scale error nor probe size error compensation, <math>\bar{y}</math>, or,</p>			
$U = k \cdot \sqrt{ E_L ^2 + \frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2 + u_D^2 + u_{temp}^2}$ $= 3 \sqrt{0.0000000 + \frac{0.0000003}{3} + \frac{0.0000030}{4} + 0.0000001 + 0.0000003} = 0.0041$			
<p>for the calibration value without scale error compensation but with probe size error compensation for inner diameter, <math>\bar{y} + E_D</math>, or,</p>			
$U = k \cdot \sqrt{ E_D ^2 + \frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2 + u_D^2 + u_{temp}^2}$ $= 3 \sqrt{0.0000006 + \frac{0.0000003}{3} + \frac{0.0000030}{4} + 0.0000001 + 0.0000003} = 0.0041$			
<p>for the calibration value with scale error compensation but without probe size error compensation, <math>\bar{y} - E_L</math>, or,</p>			
$U = k \cdot \sqrt{\frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2 + u_D^2 + u_{temp}^2}$ $= 3 \sqrt{\frac{0.0000003}{3} + \frac{0.0000030}{4} + 0.0000001 + 0.0000003} = 0.0034$			
<p>for the calibration value with both scale error compensation and probe size error compensation for inner diameter, <math>\bar{y} - E_L + E_D</math>.</p>			

Figura 3.15: Esempio di risultati di misurazioni del diametro interno di un cilindro e calcolo dell'incertezza  $U$

### 3.3.5.4 Valutazione del contributo $u_{PrbLoc}$

Il contributo di incertezza tipo derivante dall'errore medio di qualifica della posizione del tastatore viene calcolato con la seguente formula:

$$u_{PrbLoc}^2 = \frac{|E_{PrbLoc}|}{12}$$

### 3.3.5.5 Valutazione del contributo $u_{geo*dist}$

La valutazione di questo parametro viene eseguita per stimare l'incertezza di misura della deviazione di forma tra gli elementi CAD o elementi fittati ai minimi quadrati e i punti tastati sul pezzo reale. Per valutare il valore della deviazione di forma dell'elemento, vengono calcolate le distanze tra la superficie dell'elemento CAD ed i rispettivi punti acquisiti sulla superficie del pezzo fisico. L'errore di forma dell'elemento viene ottenuto come intervallo della distanza.

Una volta scelti  $n_7$  punti per valutare la deviazione di forma (punti che possono essere già inclusi tra quelli di misurazione o altri punti che possono essere ulteriormente campionati) il contributo  $u_{geo*dist}$  viene valutato attraverso la tabella ANOVA:

Come caso di esempio viene riportato il procedimento che mostra la valutazione dell'incertezza per la misurazione della planarità della faccia del pezzo.

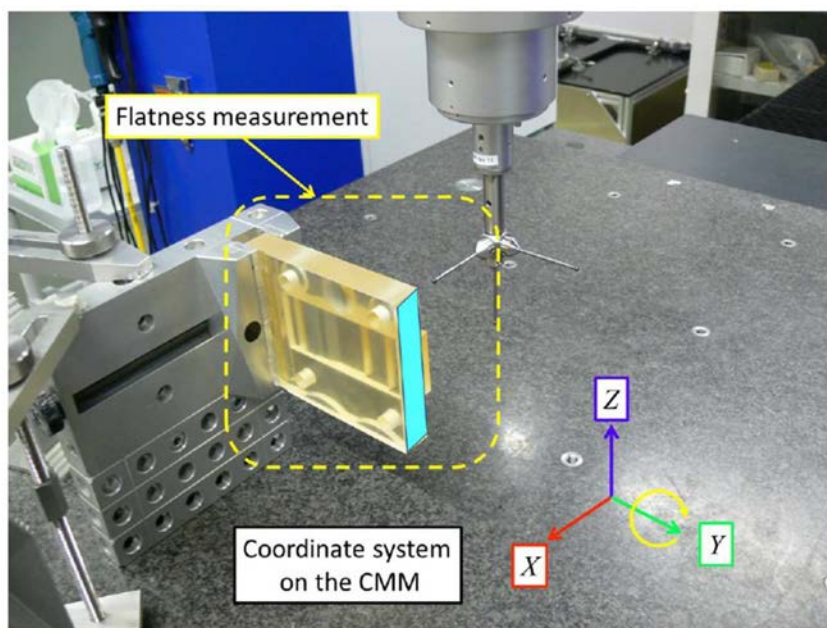


Figura 3.16: misurazione della planarità in posizione  $R_y$

	Orientation 1 (home position)	Orientation 2 (Rx position)	Orientation 3 (Ry position)	Orientation 4 (Rz position)
Cycle 1	0.0029	0.0026	0.0007	0.0009
	⋮	⋮	⋮	⋮
	-0.0019	-0.0021	-0.0012	-0.0008
Cycle 2	0.0020	0.0021	0.0007	0.0003
	⋮	⋮	⋮	⋮
	-0.0017	-0.0019	-0.0013	-0.0008
Cycle 3	0.0015	0.0019	0.0008	0.0000
	⋮	⋮	⋮	⋮
	-0.0015	-0.0019	-0.0012	-0.0007
$\bar{y}$	0.0000			
S	DOF	Variance	Expectation of the variance	

$S_A = 0.00020058$	$f_A = n_7 - 1$ $= 11$	$V_A = S_A/f_A$ $= 0.00001823$	$u_{rep}^2 + n_1$ $\cdot u_{geo \times dist}^2 + n_7$ $\cdot u_{dist}^2$ $= u_{rep}^2$ $+ 3u_{geo \times dist}^2$ $+ 12u_{dist}^2$
$S_B = 0.00000007$	$f_B = n_2 - 1 = 3$	$V_B = S_B/f_B$ $= 0.00000002$	$u_{rep}^2 + (n_2 - 1)$ $\cdot n_7 \cdot u_{geo}^2$ $= u_{rep}^2 + 36u_{geo}^2$
$S_{A \times B} = 0.00001411$	$f_{A \times B}$ $= (n_2 - 1)$ $\cdot (n_7 - 1) = 33$	$V_{A \times B}$ $= S_{A \times B}/f_{A \times B}$ $= 0.00000043$	$u_{rep}^2 + n_1$ $\cdot u_{geo \times dist}^2$ $= u_{rep}^2$ $+ 3u_{geo \times dist}^2$
$S_e = 0.0000275$	$f_e$ $= (n_1 - 1) \cdot n_2$ $\cdot n_7 = 96$	$V_e = S_e/f_e$ $= 0.00000003$	$u_{rep}^2$
$S = 0.00021751$	$f$ $= n_1 \cdot n_2 \cdot n_7$ $- 1 = 143$		
$u_{rep}^2 = V_e = 0.00000003$			
$u_{geo \times dist}^2 = (V_{A \times B} - V_e)/n_1 = 0.00000013$			
$u_{dist}^2 = (V_A - V_{A \times B})/n_7 = 0.0000015$			
# not taken into account for uncertainty evaluation			
$u_{geo}^2 = (V_B - V_e)/((n_2 - 1) \cdot n_7) = -2.8 \times 10^{-10}$			
# omitted in this case because $u_{geo}$ is an imaginary number			
$U = \sqrt{2} \cdot k \cdot \sqrt{\frac{u_{rep}^2}{n_1} + u_{geo \times dist}^2} = 3\sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{0.00000003}{3} + 0.00000013} = 0.0016$			

Figura 3.17: Tabella per la raccolta delle misure della planarit  della faccia del pezzo ed esempio di calcolo del contributo  $u_{geo \times dist}$  e dell'incertezza  $U$

### 3.3.5.6 Valutazione del contributo $u_{temp}$

Il contributo di incertezza tipo derivante dagli effetti legati alla temperatura viene calcolato con la seguente formula [24]:

$$u_{temp}^2 = u_{tempW}^2 + u_{tempN}^2$$

- $u_{tempW}$    l'incertezza con cui viene corretta la temperatura effettiva delle scale e la temperatura effettiva del pezzo durante le sue misurazioni

- $u_{tempN}$  è l'incertezza con cui vengono corretti la temperatura effettiva delle scale e la temperatura effettiva del campione di lunghezza durante le misurazioni della correzione del fattore di scala medio usando lo standard di lunghezza.

$$u_{tempN} = L * [(u_{TMtrans}^2 + u_{TMcal}^2)\alpha_M^2 + (u_{TNtrans}^2 + u_{TNcal}^2)\alpha_N^2 + (u_{\alpha M}(T_M - 20^\circ C))^2 + (u_{\alpha N}(T_N - 20^\circ C))^2]^{1/2}$$

$$u_{tempW} = L * [(u_{TMtrans}^2 + u_{TMcal}^2)\alpha_M^2 + (u_{TWtrans}^2 + u_{TWcal}^2)\alpha_W^2 + (u_{\alpha M}(T_M - 20^\circ C))^2 + (u_{\alpha W}(T_W - 20^\circ C))^2]^{1/2}$$

$u_{TMtrans}$  è il valore dell'incertezza tipo del trasferimento di temperatura macchina-termometro

$u_{TWtrans}$  è il valore dell'incertezza tipo del trasferimento di temperatura pezzo-termometro

$u_{TNtrans}$  è il valore dell'incertezza tipo del trasferimento di temperatura standard-termometro

- $u_{TMcal}$  è il valore dell'incertezza estesa del termometro (riferita alla macchina)
- $u_{TWcal}$  è il valore dell'incertezza estesa del termometro (riferita al pezzo)
- $u_{TNtrans}$  è il valore dell'incertezza estesa del termometro (riferita allo standard)
- $\alpha_M^2$  è il coefficiente di dilatazione termica termica della macchina
- $\alpha_W^2$  è il coefficiente di dilatazione termica termica del pezzo
- $\alpha_N^2$  è il coefficiente di dilatazione termica termica dello standard
- $T_M$  è il valore della temperatura (in °C) della macchina
- $T_W$  è il valore della temperatura (in °C) del pezzo
- $T_N$  è il valore della temperatura (in °C) dello standard
- $u_{\alpha M}$  è il valore dell'incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica termica della macchina
- $u_{\alpha W}$  è il valore dell'incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica termica del pezzo

- $u_{\alpha N}$  è il valore dell'incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica termica dello standard


La valutazione di  $u_{temp}$  richiede la conoscenza delle temperature della CMM (scale), del pezzo e dello standard di lunghezza che si hanno durante le misurazioni. Per ricavarle è opportuno utilizzare termometri tarati. Questa valutazione richiede inoltre la conoscenza dei coefficienti di dilatazione termica della CMM (scale), del pezzo e dello standard di lunghezza; per quest' ultimi è necessario utilizzare le informazioni date dai rispettivi produttori, o, se tali informazioni mancassero, i valori dettati dell'esperienza.

## Capitolo 4

# Sperimentazione del metodo “multiple measurement strategies”

La sperimentazione è stata eseguita utilizzando la seguente macchina di misura a coordinate di tipo cartesiano (CMM) dotata di sistema di rilevamento tattile e delle caratteristiche riportate di seguito (Fig. 4.1).

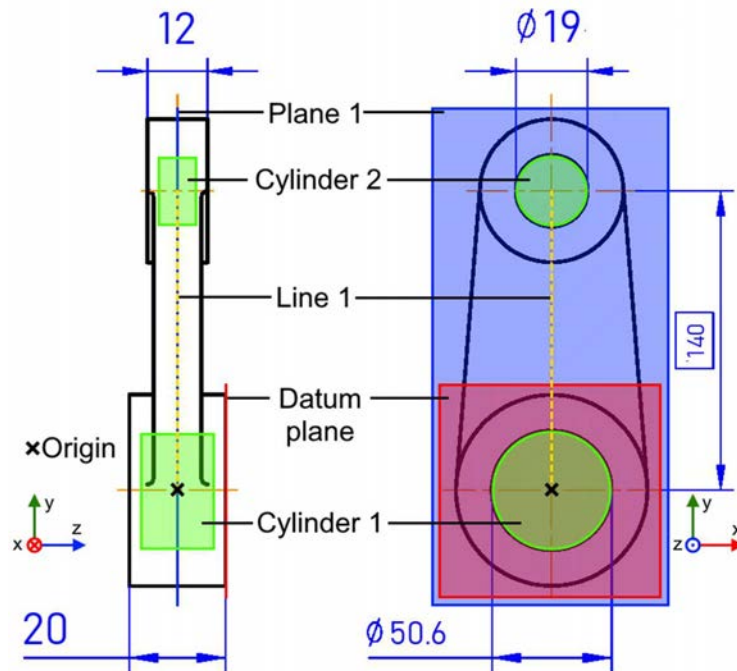
Modello di CMM	Zeiss Prismo Vast 7	
MPE length (VDI/VDE 2617)	$U_1(\mu\text{m}) = 2.2 + L/300$	
MPE probing (VDI/VDE 2617)	$V_1(\mu\text{m}) = 2.1$ (Using a sylvus 60mm long)	
Volume di misura	X / mm	900
	Y / mm	1200
	Z / mm	700
Peso max. supportato	kg	1300
Condizioni ambientali di lavoro ammesse		
Temperatura	°C	+10 + +35
Umidità	40% + 70%	



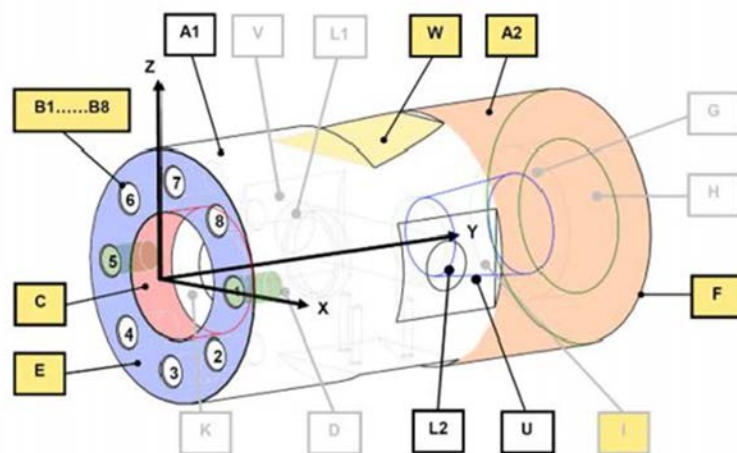
**Figura 4.1:** caratteristiche CMM impiegata

I componenti meccanici di riferimento su cui testare i metodi proposti dalla normativa sono elencati di seguito. Connecting Rod (Biella) (Fig 4.2), multi-feature check (MFC) (Fig 4.3), Freeform (Fig 4.4), steering knuckle (Fig 4.5), Involute gear (Fig 4.6), Hyperbolic Paraboloid (Fig 4.7).

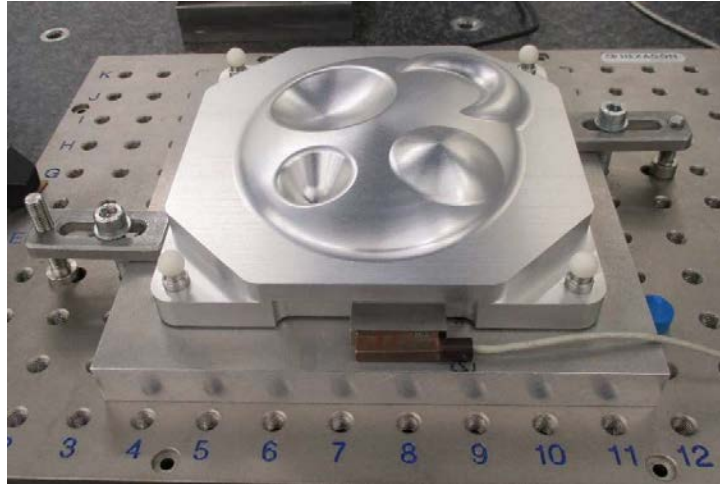
Tutte le misurazioni svolte che comprendono la verifica dei tastatori con la sfera test, le misure sul campione di lunghezza e infine quelle sui componenti in esame devono essere comprese all'interno di un volume di misura.



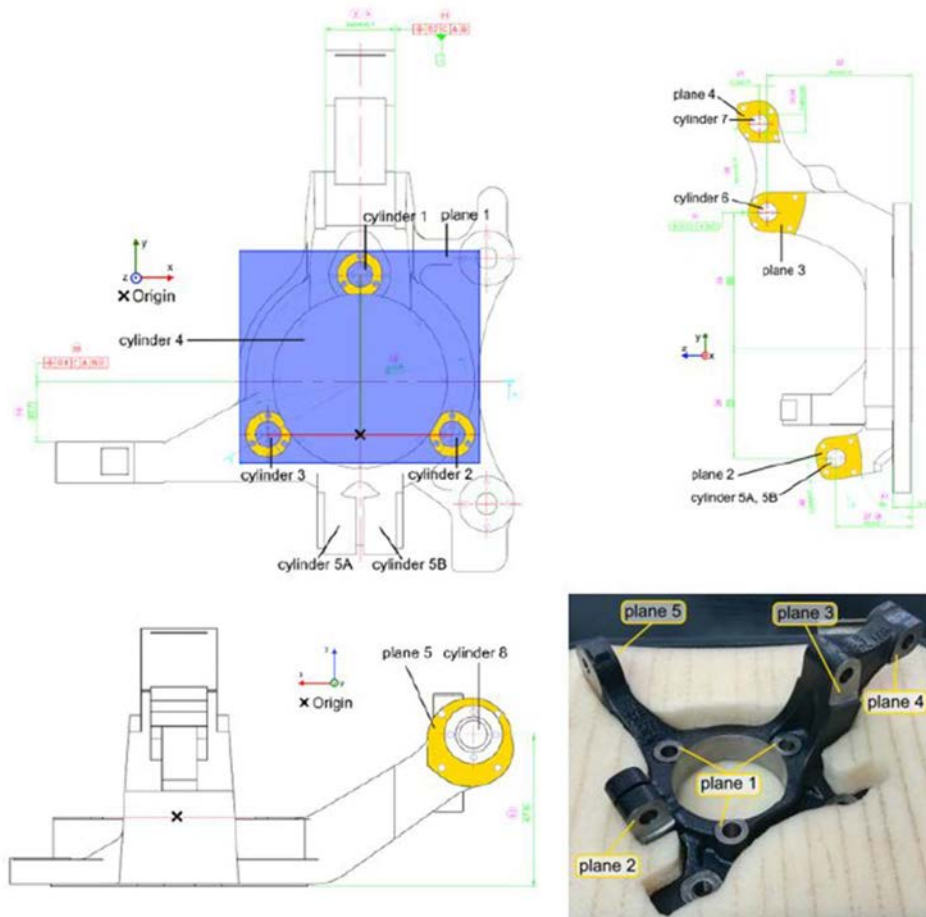
**Figura 4.2:** Connecting Rod: sistema di coordinate ed elementi di riferimento selezionati per il piano di misura



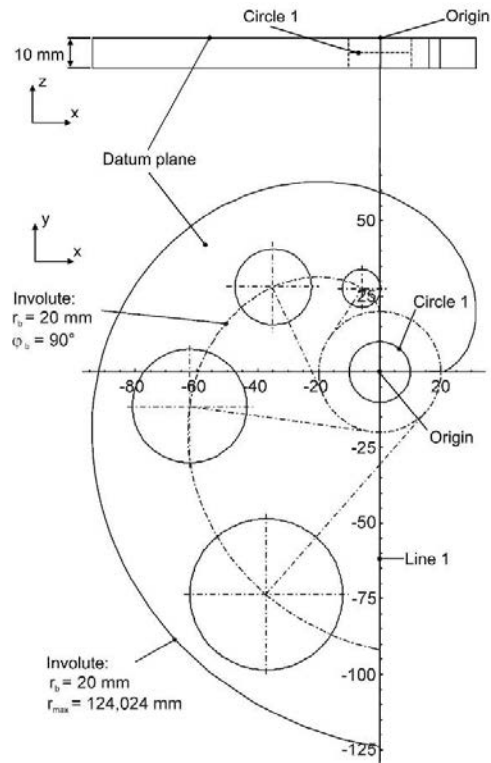
**Figura 4.3:** multi-feature check: sistema di coordinate ed elementi di riferimento selezionati per il piano di misura



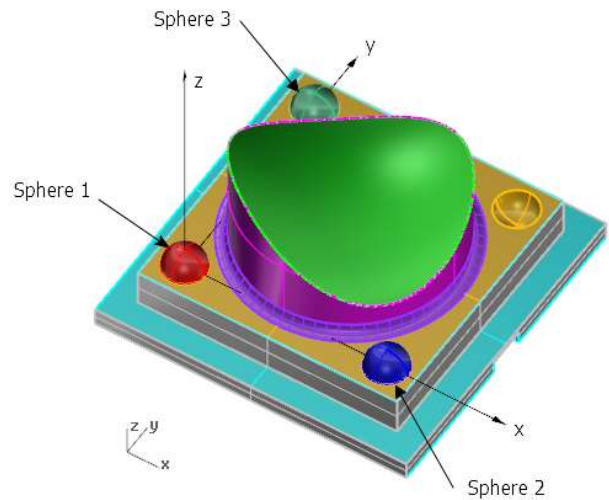
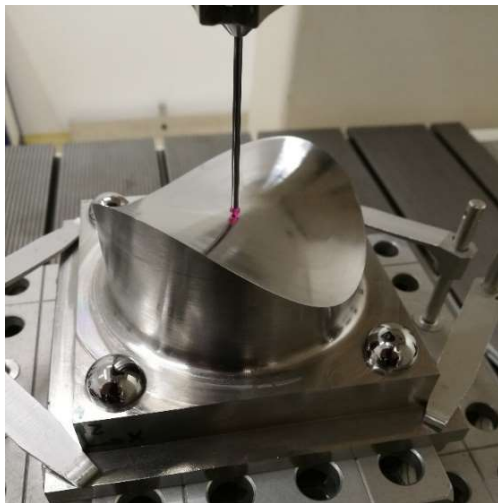
**Figura 4.4:** Freeform: posizionamento e sistema di fissaggio nel piano di misura della CMM



**Figura 4.5:** Viste dello steering knuckle con elementi di riferimento selezionati per il piano di misura



**Figura 4.6:** involute gear: disegno tecnico



**Figura 4.7:** Hyperbolic Paraboloid: posizionamento e fissaggio nel volume di misura della CMM, sistema di coordinate ed elementi di riferimento selezionati per il piano di misura

Per questo lavoro di tesi la sperimentazione si basa sull'analisi di tre tra questi campioni:

1. Primo campione: Connecting rod
2. Secondo campione: multi-feature check
3. Terzo campione: Hyperbolic Paraboloid

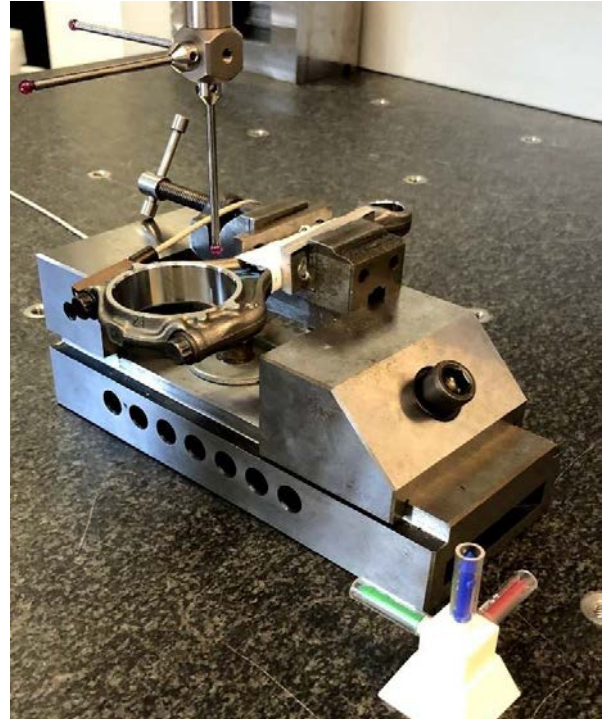
## 4.1 Primo campione: Connecting Rod

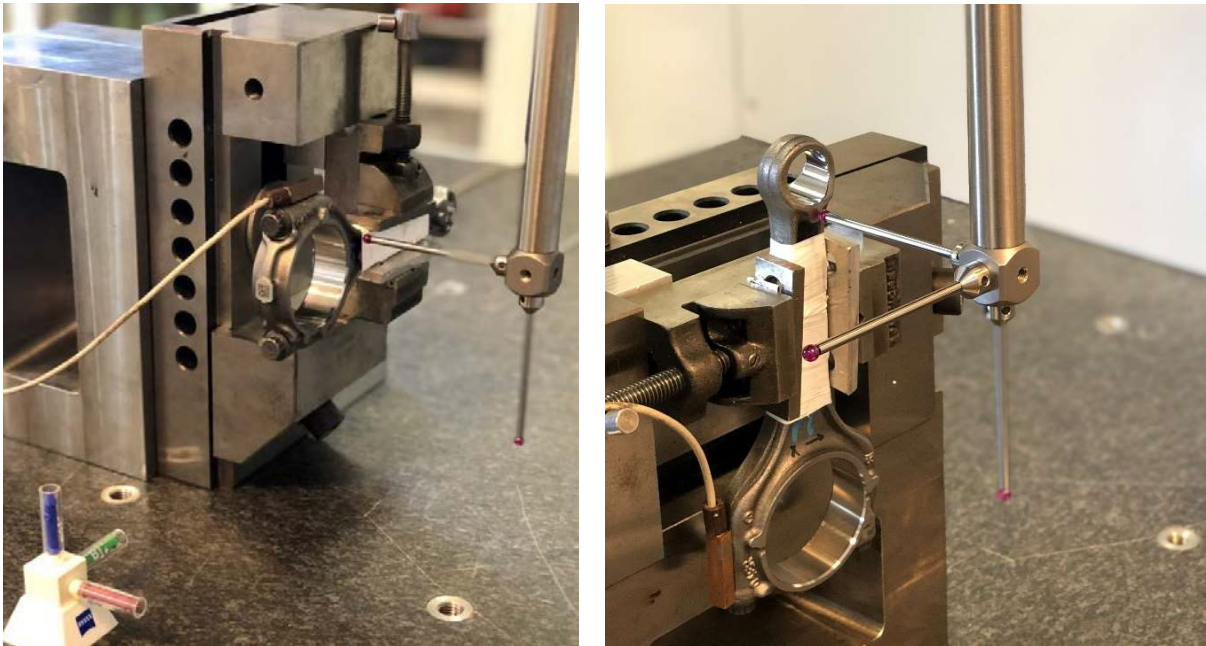
Con riferimento alla Fig 4.2 la procedura di misurazione prevede i seguenti misurandi:

1. *Diametro del cilindro 1*: con una strategia di misura che prevede delle traiettorie circolari a tre diverse altezze ( $z=8$  mm,  $z=0$  mm,  $z=-8$  mm) ognuna delle quali determinata mediante 16 punti tastati.
2. *Diametro del cilindro 2*: anche in questo caso la strategia di misura è come la precedente per il cilindro 1, ma a diverse altezze ( $z=4$  mm,  $z=0$  mm,  $z=-4$  mm).
3. *Distanza tra i centri del cerchio 3 e del cerchio 4*: questi due cerchi sono ottenuti dall'intersezione del cilindro 1 e 2 con il piano 1, definito partendo dal Datum plane.
4. *Parallelismo tra gli assi del cilindro 1 e del cilindro 2*: impostando il cilindro 1 come riferimento.
5. *Diametro del cerchio minimo circoscritto*: dei centri di tre sezioni circolari di ciascun cilindro proiettate sul piano 1.

Il piano di misura è stato svolto in assenza di un file CAD di riferimento.

Le misure sul pezzo sono state svolte, in accordo con la teoria delle *multiple measurement strategies*, in quattro diverse orientazioni, all'interno del volume di misura della CMM, a partire dalla posizione iniziale chiamata *home position* e ottenute con rotazioni di  $90^\circ$  attorno agli assi  $x$  ( $R_x$  position),  $y$  ( $R_y$  position),  $z$  ( $R_z$  position) della CMM. Le rotazioni sui vari assi si effettuano riportando il pezzo nella home position come mostrato in Figura 4.8.





**Figura 4.8:** Biella (Connecting Rod) nelle 4 posizioni di misura. In ordine Home position, Z position, Y position e X position

Prima di procedere con le misure si è scelto un sistema a tre tastatori con raggio nominale della punta di ogni tastatore pari a 2.5 mm e di lunghezza 76 mm, orientato nelle direzioni 1, 2 e 5 della CMM. I tastatori sono stati qualificati su una sfera master della CMM avente diametro nominale pari a 30 mm, che a sua volta era stata precedentemente qualificata da un *master probe* con raggio nominale pari a 4 mm, che sono risultati idonei per le misurazioni ( $\sigma \leq 0.0004$ ).



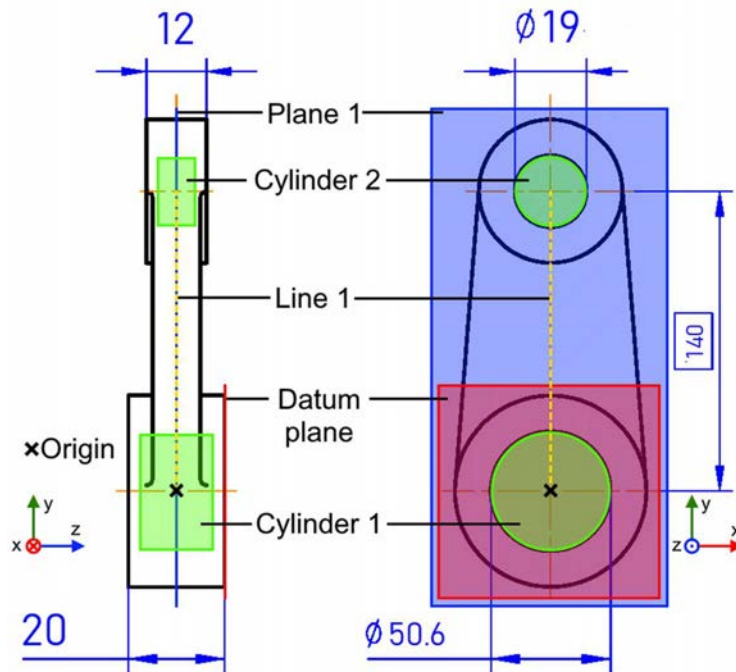
**Figura 4.9** Sfera master utilizzata per la qualifica dei tastatori

### **4.1.2 Allineamento**

Nell'utilizzare una macchina di misura a coordinate l'allineamento del pezzo in esame è una parte fondamentale per il corretto svolgimento delle misure. Tramite l'allineamento si va a definire un sistema di riferimento cartesiano sul pezzo oggetto della misura e lo si mette in relazione con il sistema di coordinate macchina. Si devono bloccare:

- *Rotazione spaziale* (definizione dell'asse principale): si costruisce un piano fittizio che identifica il piano di simmetria della biella (plane 1) distante 10 mm dal datum plane tastato (piano sul bordo del cilindro 1), l'asse z sarà normale al datum plane.
- *Rotazione planare* (definizione dell'asse secondario): si utilizza la retta che collega i centri dei cerchi 3 e 4, ottenuti dall'intersezione del piano 1 con i cilindri 1 e 2, l'asse y si troverà sulla retta che unisce i centri dei due cerchi.
- *Origine dei tre assi* (per il sistema di coordinate del pezzo): è stata ottenuta come intersezione tra l'asse del cilindro 1 e il piano 1.

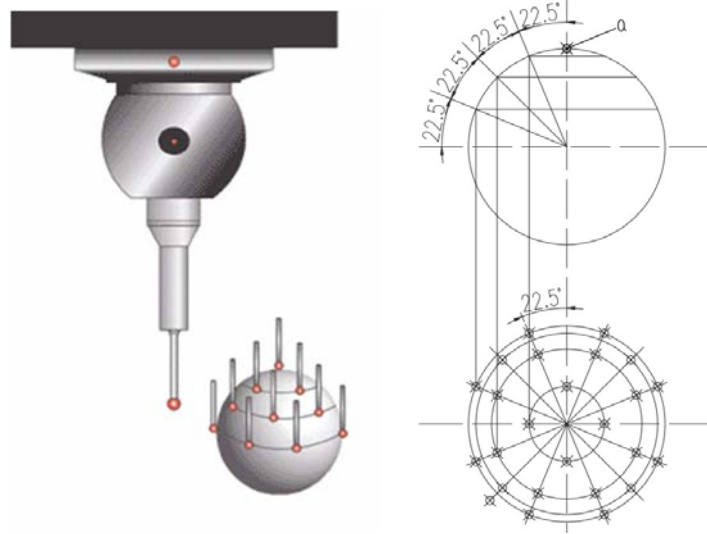
Le varie *features* della biella sono state identificate come riportato nella Figura 4.10.



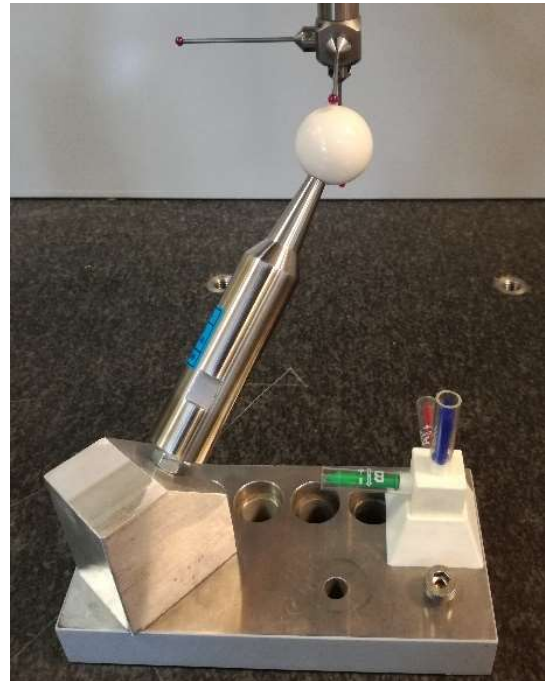
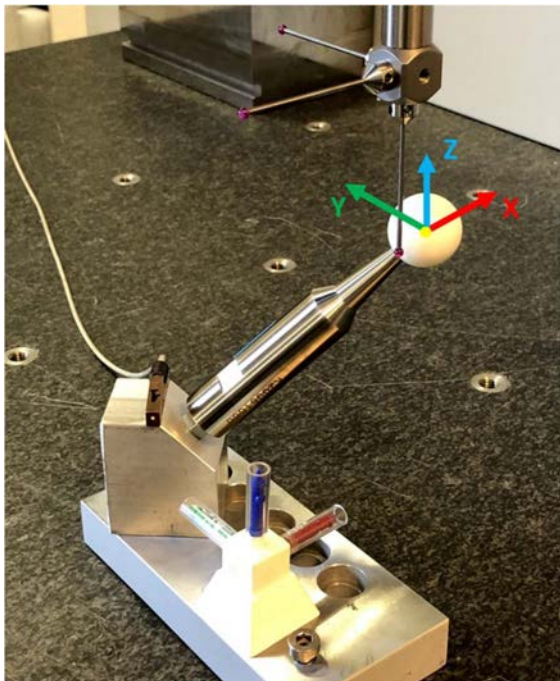
**Figura 4.9:** Connecting Rod: sistema di coordinate ed elementi di riferimento selezionati per il piano di misura

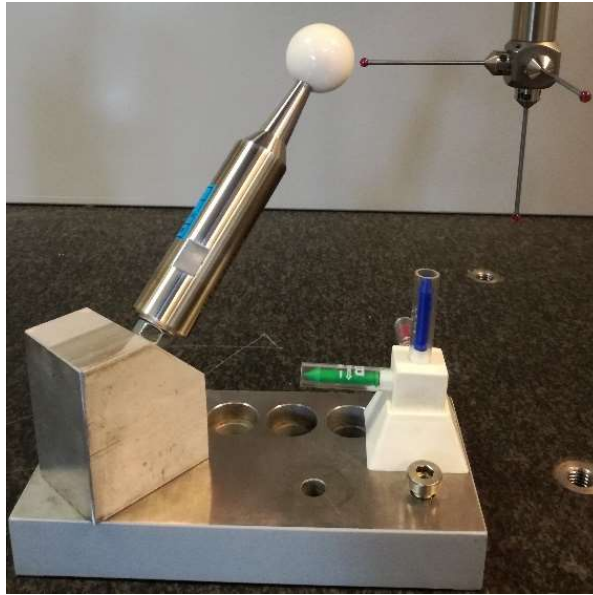
### 4.1.3 Verifica dei tastatori

La scelta del campione tarato con cui verificare il tastatore è stata guidata dalle indicazioni fornite dal Progetto EUCoM, ovvero una *sfera test* tarata, differente da quella su cui viene qualificato il sistema di tastatori. All'interno dello stesso volume della CMM in cui viene misurato il componente oggetto della sperimentazione, tale sfera è stata acquisita da ciascun tastatore appartenente al sistema, ripetendo la misura per cinque cicli, attraverso una strategia di misura che prevede 25 punti predefiniti scelti in modo tale che siano equamente distribuiti sulla superficie accessibile della sfera tester e che sia possibile acquisirli con tutti e tre i tastatori del sistema (Figura 4.11). Lo svolgimento dell'intero piano di misura è fatto in assenza di un file CAD di riferimento:



**Figura 4.11:** schema di distribuzione dei 25 punti tastati per la verifica dei tastatori sulla sfera test





**Figura 4.12:** Verifica dei tastatori con sfera test e sistema di coordinate della sfera

I risultati ottenuti sono riportati in una tabella come quella riportata di seguito, dove con L(X), L(Y) e L(Z) sono indicati i valori delle coordinate dei centri e D(•) i diametri.

	Stylus 1			Stylus 2			...	Stylus n		
Repetition 1	L(X11)	L(Y11)	L(Z11)	L(X21)	L(Y21)	L(Z21)		L(Xn1)	L(Yn1)	L(Zn1)
	D(11)			D(21)				D(n2)		
Repetition 2	L(X12)	L(Y12)	L(Z13)	L(X22)	L(Y22)	L(Z23)		L(Xn2)	L(Yn2)	L(Zn3)
	D(12)			D(22)				D(n2)		
Repetition 3	L(X13)	L(Y13)	L(Z13)	L(X23)	L(Y23)	L(Z23)		L(Xn3)	L(Yn3)	L(Zn3)
	D(13)			D(23)				D(n3)		
Repetition 4	L(X14)	L(Y14)	L(Z14)	L(X24)	L(Y24)	L(Z24)		L(Xn4)	L(Yn4)	L(Zn4)
	D(14)			D(24)				D(n4)		
Repetition 5	L(X15)	L(Y15)	L(Z15)	L(X25)	L(Y25)	L(Z25)		L(Xn5)	L(Yn5)	L(Zn5)
	D(15)			D(25)				D(n5)		
Calibr. value	D(CAL)									

**Tabella 4.1:** risultati di misura sulla sfera test per la verifica dei tastatori

Quando si hanno a disposizione i dati della sfera, si può procedere a determinare il primo contributo d'incertezza definito dalla procedura EUCoM, ovvero il calcolo dell'errore di qualifica della dimensione del tastatore  $E_D$  usando la seguente formula:

$$E_D = \frac{1}{n_5 * n_6} \sum_{j=1}^{n_5} \sum_{i=1}^{n_6} (ij D_{measstd} - D_{calstd})$$

$D_{calstd}$  è il valore **tarato** dello standard usato per la qualifica del tastatore (reperibile sul certificato di taratura), mentre  $ij D_{measstd}$  sono i valori misurati per ogni ripetizione  $i$  –  $esima$  utilizzando il tastatore  $j$  –  $esimo$ . La differenza tra questi due termini definisce l'errore, mentre i restanti termini della formula rappresentano il calcolo della media per ottenere l'errore medio  $E_D$ . Il contributo di incertezza tipo che ne deriva viene calcolato con la seguente formula:

$$u_D^2 = \left( \frac{U_{calstd,D}}{2} \right)^2 + \frac{u_{measstd,D,rep}^2}{n_5} + \frac{u_{measstd,D,geo}^2}{n_6}$$

dove  $U_{calstd,D}$  è il valore dell'incertezza estesa di calibrazione del diametro della sfera campione, reperibile sul certificato di calibrazione della sfera stessa; mentre  $u_{measstd,D,rep}$  e  $u_{measstd,D,geo}$  vengono valutate attraverso la tabella ANOVA.

È necessario definire la varianza partendo dal calcolo degli scarti quadratici e dai gradi di libertà (GDL). In tabella 4.2 sono riportati le equazioni da seguire per determinare questi parametri.

<b>S</b>	<b>GDL</b>	<b>Varianza</b>
$S_A = n_5 * \sum_{j=1}^{n_6} (\overline{D_{measstd}^j} - \overline{\overline{D_{measstd}}})^2$	$f_A = n_6 - 1$	$V_A = S_A / f_A$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_5} \sum_{j=1}^{n_6} (D_{measstd}^{ij} - \overline{D_{measstd}^j})^2$	$f_e = (n_5 - 1) * n_6$	$V_e = S_e / f_e$
$S = \sum_{i=1}^{n_5} \sum_{j=1}^{n_6} (D_{measstd}^{ij} - \overline{\overline{D_{measstd}}})^2$	$f = n_5 * n_6 - 1$	

**Tabella 4.2:** tabella ANOVA per la valutazione degli scarti quadratici, GDL e varianza

Indichiamo con:

- $n_5$ : numero delle ripetizioni
- $n_6$ : numero dei tastatori utilizzati
- $\overline{D_{measstd}^j}$ : valore medio delle misure per il singolo tastatore j-esimo
- $\overline{\overline{D_{measstd}}}$ : valore medio di tutte le misure
- $D_{measstd}^{ij}$ : valore della singola misura

- $S_A$ : somma degli scarti quadratici delle medie dei singoli tastatori  $\overline{D_{measstd}^j}$  dalla media generale  $\overline{D_{measstd}}$
- $S_e$ : somma degli scarti quadratici dei singoli valori  $D_{measstd}^{ij}$  rispetto alla media  $\overline{D_{measstd}^j}$  del tastatore a cui appartengono
- $S$ : somma degli scarti quadratici di tutti i singoli valori rispetto alla media generale

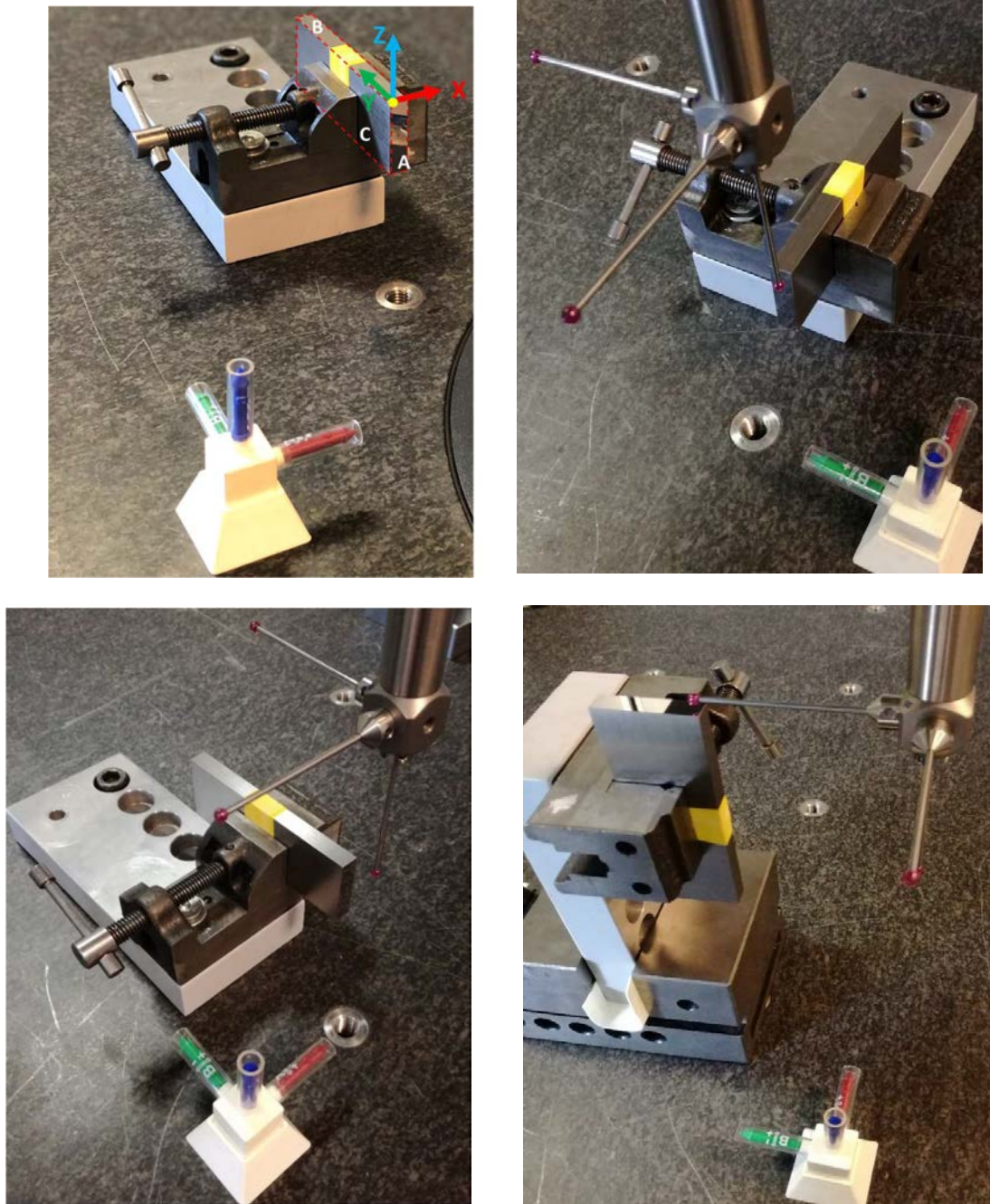
È possibile determinare i contributi di incertezza:

$$u_{measstd,D,rep}^2 = V_e$$

$$u_{measstd,D,geo}^2 = \frac{V_A - V_e}{n_5}$$

#### **4.1.4 Misurazioni su campione di lunghezza**

La procedura EUCoM prevede delle misure su un campione di lunghezza per determinare la compensazione *dell'errore di scala della CMM* nelle zone di interesse e per la valutazione dell'incertezza che ne deriva. A questo scopo è stato utilizzato un blocchetto di riscontro di lunghezza nominale di 100 mm che è stato misurato in tre direzioni (x, y, z) corrispondenti ai tre assi della macchina, approssimativamente ortogonali tra loro (Fig. 4.13) e sono stati eseguiti cinque cicli di misura nello stesso volume della CMM in cui è stata misurata la biella. Di tale campione è stata valutata la lunghezza, i cui valori sono riportati nel formato di Tabella 4.3, in accordo con la procedura proposta dal Progetto EUCoM.



**Figura 4.13:** sistema di coordinate e le tre orientazioni per la misura dello standard di lunghezza (X direction; Y direction; Z direction)

I valori ottenuti sono riportati in una tabella come la seguente:

	Standard aligned to x	Standard aligned to y	Standard aligned to z
Repetition 1	$E(X1)$	$E(Y1)$	$E(Z1)$
Repetition 2	$E(X2)$	$E(Y2)$	$E(Z2)$
Repetition 3	$E(X3)$	$E(Y3)$	$E(Z3)$
Repetition 4	$E(X4)$	$E(Y4)$	$E(Z4)$
Repetition 5	$E(X5)$	$E(Y5)$	$E(Z5)$
Calibration value	$E(XCAL)$	$E(YCAL)$	$E(ZCAL)$

**Tabella 4.3:** risultati di misura del campione di lunghezza

Utilizzando le misure acquisite del campione di lunghezza, si esegue il calcolo dell'errore medio di scala  $E_L$  nella regione d'interesse della macchina, con la seguente formula:

$$E_L = \frac{1}{(n_3 * n_4)} \sum_{j=1}^{n_4} \sum_{i=1}^{n_3} (ij L_{measstd} - L_{calstd})$$

$L_{calstd}$  è il valore tarato del campione di lunghezza (reperibile sul certificato di taratura), mentre  $ij L_{measstd}$  sono i valori misurati per ogni ripetizione  $i$  –esima nella specifica orientazione  $j$ -esima. La differenza tra questi due termini definisce l'errore, mentre i restanti termini della formula rappresentano il calcolo della media per ottenere l'errore medio  $E_L$ .

Il contributo di incertezza tipo derivante dall'errore di scala viene calcolato con la seguente formula:

$$u_L^2 = \left( \frac{U_{calstd,L}}{2} \right)^2 + \frac{u_{measstd,L,rep}^2}{n_3} + \frac{u_{measstd,L,geo}^2}{n_4}$$

Dove  $U_{calstd,L}$  è il valore dell'incertezza estesa di taratura del campione di lunghezza, reperibile sul certificato di calibrazione dello standard stesso, mentre  $u_{measstd,L,rep}$  e  $u_{measstd,L,geo}$  vengono valutate attraverso la tabella ANOVA, come nel caso precedente della sfera test. È necessario definire la varianza partendo dal calcolo degli scarti quadratici e dai gradi di libertà (GDL). In Tabella 4.4 sono riportati le equazioni da seguire per determinare questi parametri.

S	GDL	Varianza
$S_A = n_3 * \sum_{j=1}^{n_4} (\overline{L_{measstd}^j} - \overline{\overline{L_{measstd}}})^2$	$f_A = n_4 - 1$	$V_A = S_A/f_A$
$S_e = \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_4} (L_{measstd}^{ij} - \overline{L_{measstd}^j})^2$	$f_e = (n_3 - 1) * n_4$	$V_e = S_e/f_e$
$S = \sum_{i=1}^{n_3} \sum_{j=1}^{n_4} (L_{measstd}^{ij} - \overline{\overline{L_{measstd}}})^2$	$f = n_3 * n_4 - 1$	

**Tabella 4.4:** tabella ANOVA per la valutazione degli scarti quadratici, GDL e varianza

Indichiamo con:

- $n_3$ : numero delle ripetizioni
- $n_4$ : numero delle orientazioni
- $\overline{L_{measstd}^j}$ : valore medio delle misure per singola orientazione j-esimo
- $\overline{\overline{L_{measstd}}}$ : valore medio di tutte le misure
- $L_{measstd}^{ij}$ : valore della singola misura
- $S_A$ : somma degli scarti quadratici delle medie delle singole orientazioni  $\overline{L_{measstd}^j}$  dalla media generale  $\overline{\overline{L_{measstd}}}$
- $S_e$ : somma degli scarti quadratici dei singoli valori  $L_{measstd}^{ij}$  rispetto alla media  $\overline{L_{measstd}^j}$  dell'orientazione a cui appartengono
- $S$ : somma degli scarti quadratici di tutti i singoli valori rispetto alla media generale

È possibile determinare i contributi di incertezza:

$$u_{measstd,L,rep}^2 = V_e$$

$$u_{measstd,L,geo}^2 = \frac{V_A - V_e}{n_3}$$

### ***4.1.5 Misurazioni effettuate sul primo campione***

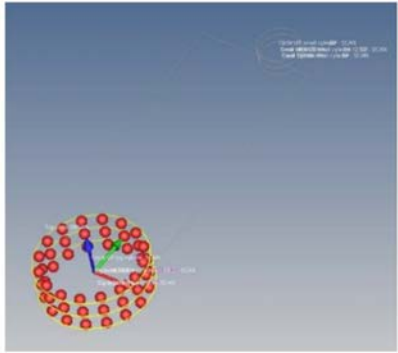
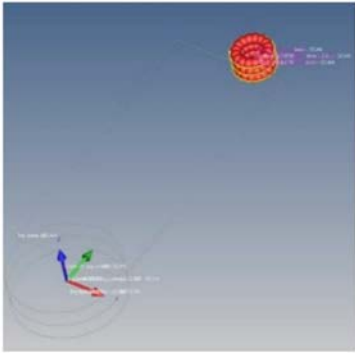
Il piano di misura della biella proposto dal progetto EUCoM prevede di valutare le seguenti caratteristiche:

- *2.5.1 Diametro delle circonferenze 3 (Big Circle) e 4 (Small Circle) ottenuti dall'intersezione del piano 1 con i cilindri 1 e 2*
- *2.5.2 Distanza tra i centri delle circonferenze 3 e 4 ottenuti dell'intersezione del piano 1 con i cilindri 1 e 2*
- *2.5.3 Parallelismo tra l'asse del cilindro 1 e l'asse del cilindro 2 (con il cilindro 1 come riferimento)*
- *2.5.4 (caso A) Diametro del minimo cerchio circoscritto che si ottiene dalla proiezione sul piano 1 dei centri delle tre circonferenze utilizzate per misurare un cilindro (valutata con la strategia di misura CNC 2 – CNC 3)*
- *2.5.4.2 (caso B) Diametro del minimo cerchio circoscritto 3 e 4, dato dall'intersezione del cilindro 1 e 2 con il piano 1 (valutata con la strategia di misura CNC 1).*

Queste caratteristiche sono state misurate nelle quattro orientazioni del pezzo (home position, x position, y position, z position) e sono stati eseguiti cinque cicli di misura per ogni orientazione. Alla fine di ogni ciclo è stato allentato e fissato nuovamente il sistema di bloccaggio su cui è montata la biella, di conseguenza è stato eseguito l'allineamento del pezzo prima di ogni ciclo di misura. Per la valutazione delle caratteristiche sono stati utilizzati dei piani di misura uguali a quelli utilizzati per l'allineamento,

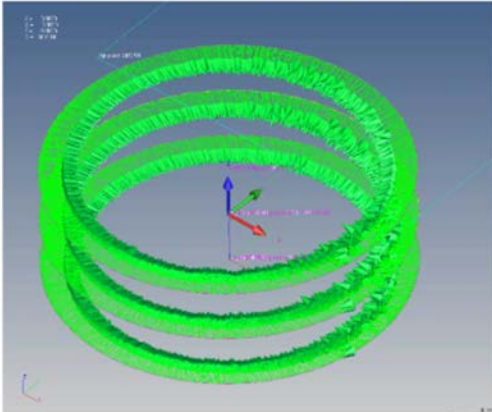
Per determinare queste caratteristiche sono state svolte differenti strategie di misurazione, come riportato nell'UNIPD TEST REPORT [18], definite come:

- **CNC 1 e CNC 2:** strategia a punti singoli in cui i due cilindri sono calcolati con 3 traiettorie circolari di 16 punti equamente distribuiti, come riportato in Tabella 4.5.

Cylinder 1 (Big Cylinder)		Cylinder 2 (Small Cylinder)	
z = 8 mm		z = 4 mm	
z = 0 mm	<i>Defined as Circle 3 (Big Circle SP)</i>	z = 0 mm	<i>Defined as Circle 4 (Small Circle SP)</i>
z = -8 mm		z = -4 mm	
			

**Tabella 4.5:** strategia di misura a punti singoli

- **CNC 3:** strategia di misura a scansione in cui i due cilindri sono calcolati con 3 traiettorie circolari di punti equamente distribuiti, Tabella 4.6. Sono state analizzate quattro diverse velocità di scansione,  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  e  $V_d$ . La velocità  $V_b$  è stata eseguita per tutte le orientazioni, mentre le altre tre velocità solo per la Home position.

Cylinder 1 (Big Cylinder)		Cylinder 2 (Small Cylinder)	
z = 8 mm		z = 4 mm	
z = 0 mm	Defined as Circle 3 (Big Circle SCAN)	z = 0 mm	Defined as Circle 4 (Small Circle SCAN)
z = -8 mm		z = -4 mm	
N° of points: 1590 Step width: 0,1 mm		N° of points: 598 Step width: 0,1 mm	
			

**Tabella 4.6:** strategia di misura a scansione

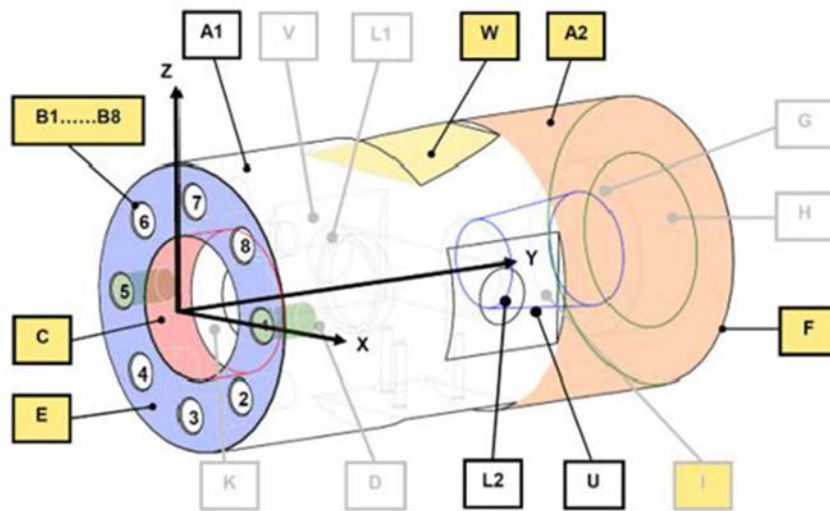
SCAN SPEED SUMMARY [mm / s]	Va	Vb	Vc	Vd
CIRCLE PROBING PATH	1	5	20	40

**Tabella 4.7:** valori delle velocità di scansione utilizzate nel CNC 3

## 4.2 Secondo campione: Multi Feature Check (MFC)

In riferimento alla Figura 4.13, per il Multi-Feature-Check (MFC) il progetto EUCoM ha scelto di analizzare i seguenti misurandi relativi alle features evidenziate:

- cilindro A1 → diametro esterno; rettilineità della superficie; circolarità, cilindricità
- cilindro B1, B5 → diametro interno; distanza tra i due fori
- cilindro C → diametro interno; ortogonalità del piano E rispetto all'asse C; concentricità del cerchio interno rispetto all'asse del cilindro A1; oscillazione circolare del cerchio interno rispetto ad A1, oscillazione totale del cilindro C rispetto al cilindro A1
- piano E, F → planarità; distanza fra i due piani; parallelismo fra i due piani
- cono K → angolo del cono; diametro a 20 mm dal piano E
- piano W → inclinazione rispetto ad A1



**Figura 4.13:** Multi-Feature-Check: sistema di coordinate ed elementi di riferimento selezionati per il piano di misura

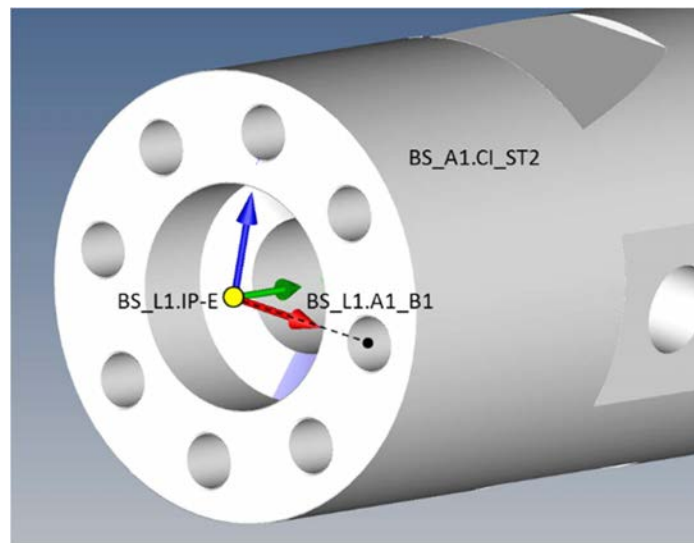
Per ogni misurando è prevista una strategia di misura a scansione, non a punti singoli. Queste caratteristiche sono state misurate nelle quattro orientazioni previste del *multi-feature check* (home position, x position, y position, z position) e sono stati eseguiti cinque cicli di misura per ogni orientazione. Alla fine di ogni ciclo è stato allentato e fissato nuovamente il sistema di bloccaggio su cui è montato, di conseguenza è stato eseguito l'allineamento del pezzo prima di ogni ciclo di misura.

Prima di iniziare le misurazioni sul pezzo, come nel caso della biella, è stato necessario fare la qualifica dei tastatori utilizzati, un sistema a 4 tastatori con raggio nominale della punta di ognuno di essi pari a 4 mm e di lunghezza 114 mm, orientato nelle direzioni 1, 2, 3 e 4 della CMM. I tastatori sono stati qualificati su una sfera master della CMM avente diametro nominale pari a 30 mm, che a sua volta era stata precedentemente qualificata da un *master probe* con raggio nominale pari a 4 mm, che sono risultati idonei per le misurazioni ( $\sigma \leq 0.0004$ ).

### 4.2.1 Allineamento del MFC

Come già spiegato precedentemente, nell'utilizzare una macchina di misura a coordinate l'allineamento del pezzo in esame è una parte fondamentale per il corretto svolgimento delle misure. Tramite l'allineamento si va a definire un sistema di riferimento cartesiano sul pezzo oggetto della misura e lo si mette in relazione con il sistema di coordinate macchina. Per il MFC si devono bloccare:

- *Rotazione spaziale* (definizione dell'asse principale): si identifica mediante il cilindro BS\_A1.CI\_ST2, definito da cinque circonferenze a partire dal piano E.
- *Rotazione planare* (definizione dell'asse secondario): si utilizza la retta BS\_LI\_A1.B1 che collega i centri del cilindro A1 e del foro B1, ottenuti dall'intersezione del piano E con i cilindri A1 e B1, l'asse x si troverà sulla retta che unisce i due centri.
- *Origine dei tre assi* (per il sistema di coordinate del pezzo): BS\_A1.IP-E è stata ottenuta come intersezione tra l'asse del cilindro A1 e il piano E.

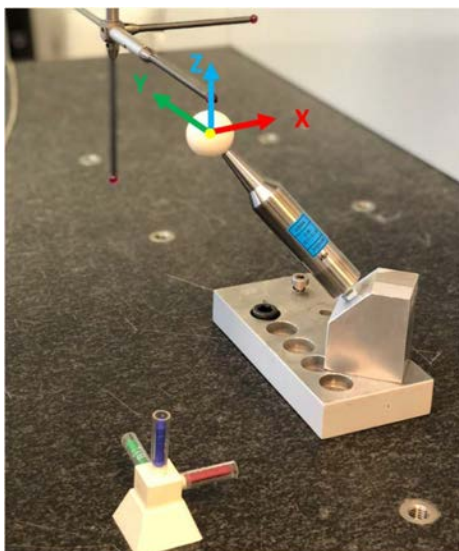


**Figura 4.14:** MFC: sistema di coordinate ed elementi di riferimento selezionati per il piano di misura

#### 4.2.2 Verifica dei tastatori

A questo è seguita la verifica dei tastatori. La scelta del campione tarato con cui verificare il tastatore è stata guidata dalle indicazioni fornite dal Progetto EUCoM, ovvero una *sfera master* tarata, differente da quella su cui viene qualificato il sistema di tastatura. Tale sfera è stata acquisita da ciascun tastatore appartenente al sistema, ripetendo la misura per cinque cicli, attraverso una strategia di misura che prevede 25 punti predefiniti scelti in modo tale che siano equamente distribuiti sulla superficie accessibile della sfera tester e che sia possibile acquisirli con tutti e quattro i tastatori del sistema.

Quando si hanno a disposizione i dati della sfera, si può procedere a determinare il primo contributo d'incertezza definito dalla procedura EUCoM, ovvero il calcolo *dell'errore di qualifica della dimensione del tastatore*  $E_D$ , seguendo le stesse procedure del caso precedente.

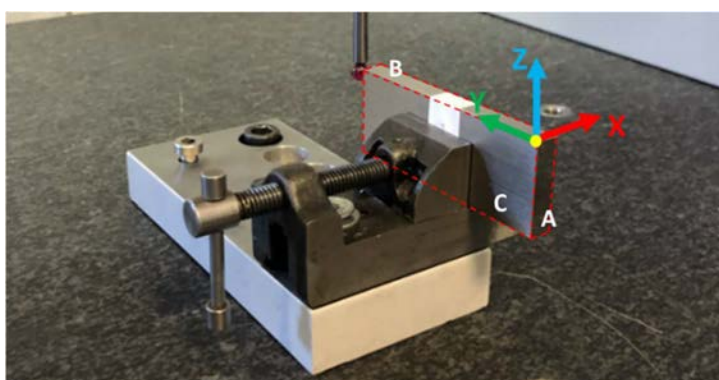


**Figura 4.15:** sfera test per la verifica dei tastatori e rappresentazione del sistema di coordinate

### **4.2.3 Misurazioni su campione di lunghezza**

Allo stesso modo fatto nel caso della biella, la procedura EUCoM prevede delle misure su un campione di lunghezza per determinare la compensazione *dell'errore di scala* della CMM nelle zone di interesse e per la valutazione dell'incertezza che ne deriva. Come nel caso già studiato, è stato utilizzato un blocchetto di riscontro di lunghezza nominale di 100 mm che è stato misurato in tre direzioni ( x, y, z) corrispondenti ai tre assi della macchina, e sono stati eseguiti cinque cicli di misura.

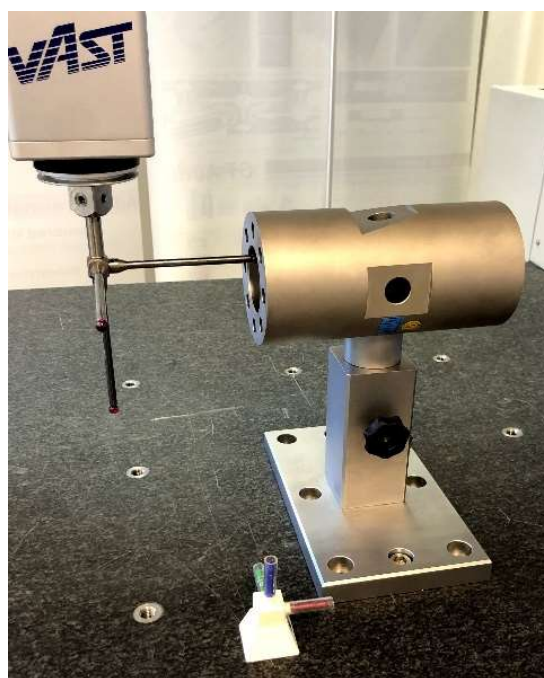
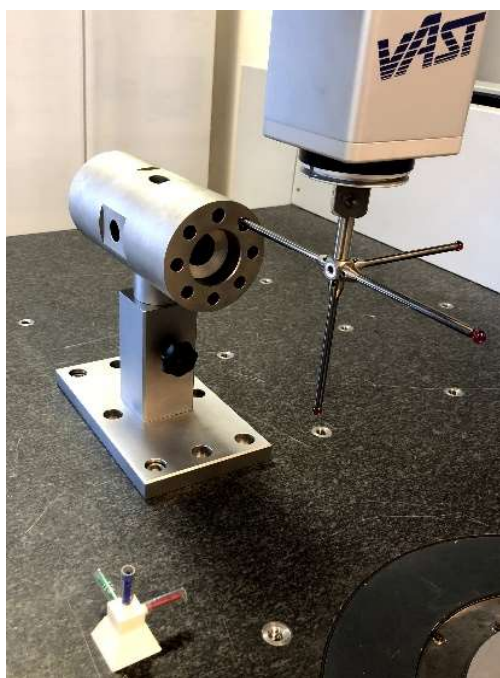
Utilizzando le misure acquisite dallo standard di lunghezza, si esegue il calcolo dell'*errore medio di scala*  $E_L$  nella regione d'interesse della macchina, come fatto precedentemente.

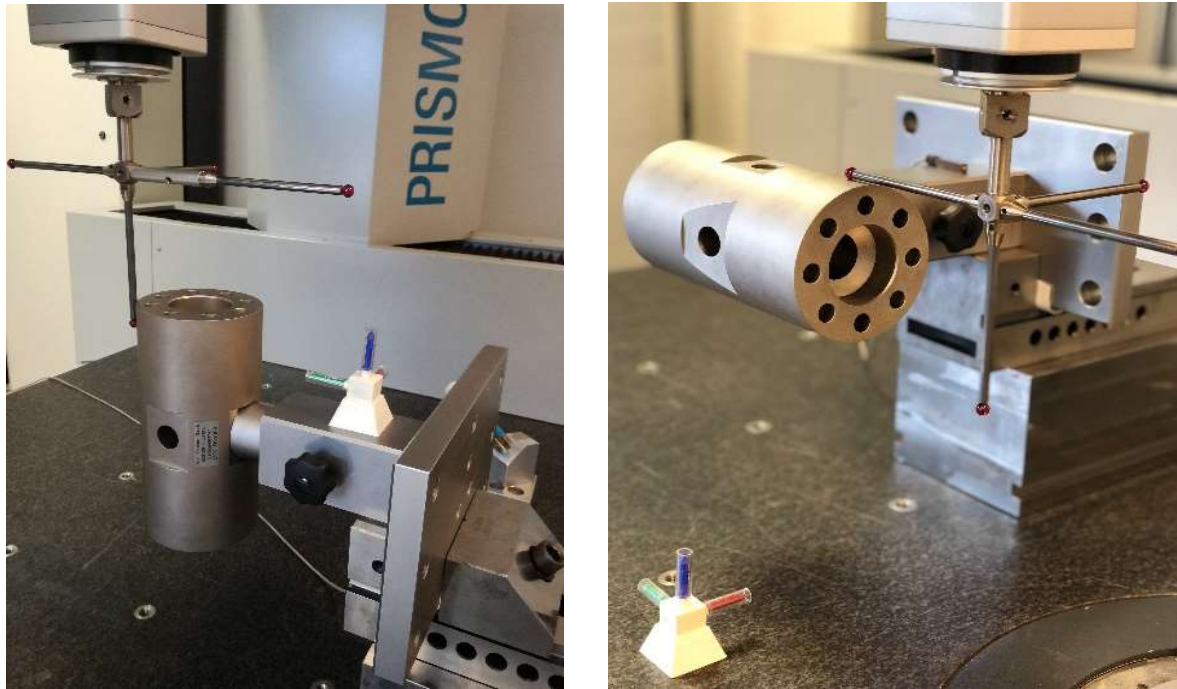


**Figura 4.16:** misurazione del campione di lunghezza e rappresentazione del sistema di coordinate

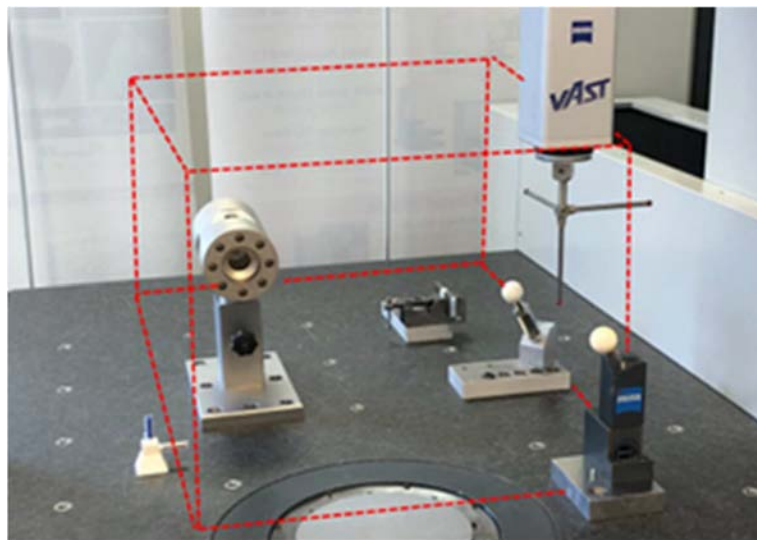
#### 4.2.4 Misurazioni effettuate sul secondo campione

Le misure sul pezzo sono state svolte, in accordo con la teoria delle *multiple measurement strategies*, in quattro diverse orientazioni a partire dalla posizione iniziale chiamata *home position* e ottenute con rotazioni di  $90^\circ$  attorno agli assi x (*Rx position*), y (*Ry position*), z (*Rz position*) della CMM. Le rotazioni sui vari assi si effettuano riportando il pezzo nella *home position* come mostrato in Figura 4.17. In Figura 4.18 è schematizzato il volume di controllo che comprende la verifica dei tastatori con la sfera test, le misure sul campione di lunghezza e infine quella sul MFC.





**Figura 4.17:** MFC nelle 4 posizioni in cui è stata misurata. In ordine Home position, Z position, X position e Y position



**Figura 4.18:** identificazione del volume di misura della CMM contenente il campione di lunghezza, la sfera test e il MFC

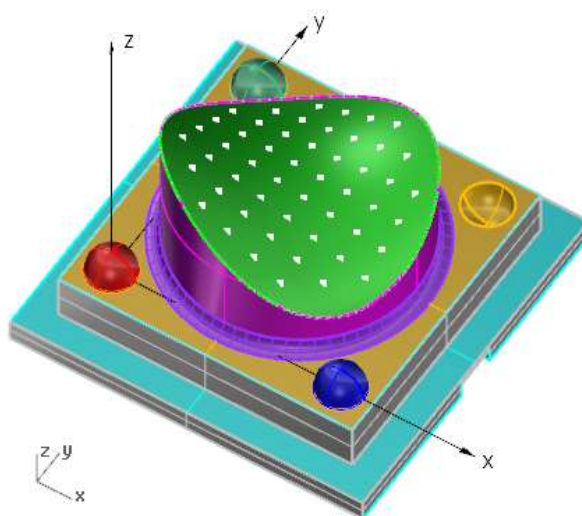
La strategia di misura segue le indicazioni descritte nel certificato di taratura Eumetron [21] e riportati nel nel Test report Multi Feature Check che descrive i risultati ottenuti tramite misurazioni presso l'Università di Padova [18] ; prevede che tutti i misurandi siano definiti con una strategia a scansione. Tuttavia, per ampliare la raccolta di informazioni è stata eseguita anche una metodologia di misura a punti singoli. Quindi ci sono due set di dati raccolti così definiti:

- SCAN MODE: strategia di scansione e numero di punti acquisiti in accordo con il certificato Eumetron del progetto
- SINGLE POINTS (SP) MODE: strategia a punti singoli equamente distribuiti sui percorsi utilizzati in scansione

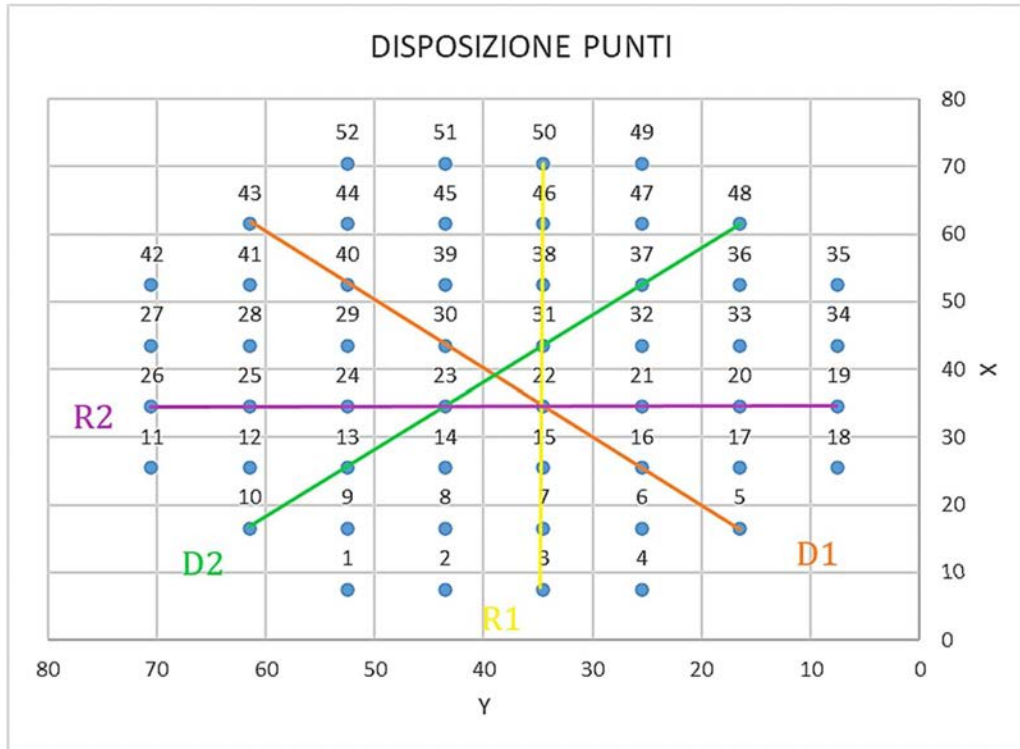
### **4.3 Terzo campione: Hyperbolic Paraboloid (HP)**

Con riferimento alla Fig 4.19 la procedura di misurazione prevede di misurare 52 punti distribuiti equamente sulla superficie a cui si vuole aggiungere una strategia di misura a scansione lungo delle rette, pertanto il piano di misura prevede due modalità, descritte nell'UNIPD TEST REPORT Hyperbolic Paraboloid – 2020 [20]:

- POINT TO POINT TACTILE MEASUREMENT: la misurazione è rappresentata dalla deviazione della normale alla superficie dei 52 punti tastati rispetto alla superficie di riferimento data dal CAD.
- SCANNING MODE: sono state definite 4 rette sulla superficie del componente che passano per alcuni dei 52 punti definiti dal measurement plan del progetto. Queste sono meglio definite osservando la Fig 4.20.



**Figura 4.19:** Hyperbolic Paraboloid: sistema di coordinate ed elementi di riferimento selezionati per il piano di misura



	numero dei punti							
D1	5	16	22	30	40	43		
D2	10	13	23	31	37	48		
R1	3	7	15	22	31	38	46	50
R2	19	20	21	22	23	24	25	26

**Figura 4.20:** schema della disposizione dei 52 punti sulla superficie del pezzo

Lo scopo della strategia in scansione lungo queste rette è quello di acquisire un gran numero di punti da poter elaborare mediante un foglio di calcolo Excel, per confrontare i risultati ottenuti a punti singoli e quelli in scansione. Come lavoro futuro si vorrebbe utilizzare un software attraverso un codice Matlab, denominato Multical, che consente di elaborare una grande quantità di dati, calcolando e rappresentando i dati raccolti da misurazioni su macchine CMM. Questa sarà un'attività futura, in quanto il software Multical richiede una revisione. Quello che sarà svolto, in questo lavoro di tesi, riguarderà il confronto tra i dati raccolti mediante la strategia di misura a punti singoli e quella a scansione lungo queste rette, andando a estrapolare i corrispondenti punti, riportati nella tabella di Fig 4.20. Per questo è stato necessario definire con accuratezza lo *step width* da impostare nel programma CNC di Calypso, in modo da calcolare, durante la scansione, i punti che si trovano nell'intorno più vicino ai punti definiti dalla strategia a punti singoli. In questo

modo si può procedere con una buona approssimazione a confrontare la deviazione della normale alla superficie calcolata con queste due strategie: a punti singoli e a scansione.

Prima di procedere con le misure si è scelto un sistema a tre tastatori con raggio nominale della punta di ogni tastatore pari a 2 mm, orientato nelle direzioni 1, 2 e 5 della CMM. Il piano di misura fornito dal progetto EUCoM consiglia di utilizzare tastatori di diametro non superiore a 5 mm, in quanto per diametri superiori a questo si devono prendere delle precauzioni quando si effettua l'allineamento, ovvero traslare in direzione +Z i cerchi tastati per definire le tre sfere necessarie per l'allineamento. I tastatori sono stati qualificati su una sfera master della CMM avente diametro nominale pari a 30 mm, che a sua volta era stata precedentemente qualificata da un *master probe* con raggio nominale pari a 4 mm, che sono risultati idonei per le misurazioni ( $\sigma \leq 0.0004$ ).

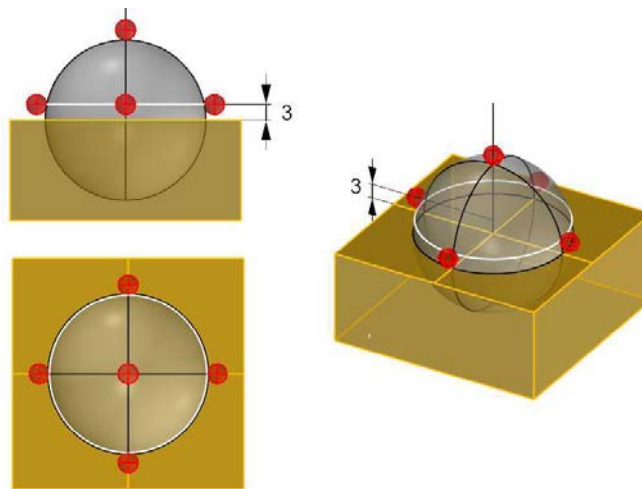
A questo è seguita la verifica dei tastatori, secondo le indicazioni fornite dal progetto EUCoM, utilizzando una *sfera master* tarata, con la stessa procedura già descritta nel Capitolo 4.1.3 per la *Biella* e nel Capitolo 4.2.1 per il *Multi-Feature-Check*.

La procedura EUCoM prevede delle misure su un campione di lunghezza per determinare la compensazione *dell'errore di scala della CMM* nelle zone di interesse e per la valutazione dell'incertezza che ne deriva. A questo scopo è stato utilizzato un blocchetto di riscontro di lunghezza nominale di 100 mm che è stato misurato in tre direzioni (x, y, z) corrispondenti ai tre assi della macchina. Anche qui la procedura è analoga a quella svolta per la *Biella* e per il *Multi-Feature-Check*, come descritto nel Capitolo 4.1.4 e 4.2.2.

### **4.3.2 Allineamento**

Fondamentale nell'utilizzo di una macchina di misura a coordinate è l'allineamento del pezzo in esame per svolgere correttamente le misure. Si va a definire un sistema di riferimento cartesiano sul pezzo oggetto della misura e lo si mette in relazione con il sistema di coordinate macchina. Per il componente in esame si devono bloccare:

- *Rotazione spaziale* (definizione dell'asse principale): si identifica mediante il piano definito dai centri delle tre sfere, misurate con 5 punti, di cui uno è collocato nel punto più alto della sfera e i rimanenti quattro punti sono equamente distribuiti lungo la circonferenza ad un'altezza di 3 mm dal piano. Fig. 4.21
- *Rotazione planare* (definizione dell'asse secondario): si utilizza la retta che collega i centri di due sfere.
- *Origine dei tre assi* (per il sistema di coordinate del pezzo): è dato dal centro della sfera 1.



**Figura 4.21:** posizione dei punti misurati nelle tre sfere per l'allineamento

### **4.3.3 Misurazioni effettuate sul terzo campione**

Le misurazioni sono state effettuate sempre nelle quattro orientazioni in accordo con la teoria delle *multiple measurement strategies*, a partire dalla posizione iniziale *home position* e ottenute con rotazioni di  $90^\circ$  attorno agli assi x (*Rx position*), y (*Ry position*), z (*Rz position*) della CMM. Le rotazioni sui vari assi si effettuano riportando il pezzo nella *home position* come mostrato in Figura 4.22. Ricordiamo che tutte le misurazioni svolte dalla verifica dei tastatori con la sfera test, le misure sul campione di lunghezza e infine quelle sul Hyperbolic Paraboloid devono essere comprese all'interno di un volume di misura.



**Figura 4.22:** *Hyperbolic Paraboloid nelle 4 posizioni di misura. In ordine Home position, Z position, Y position e X position*

# Capitolo 5

## Risultati della sperimentazione

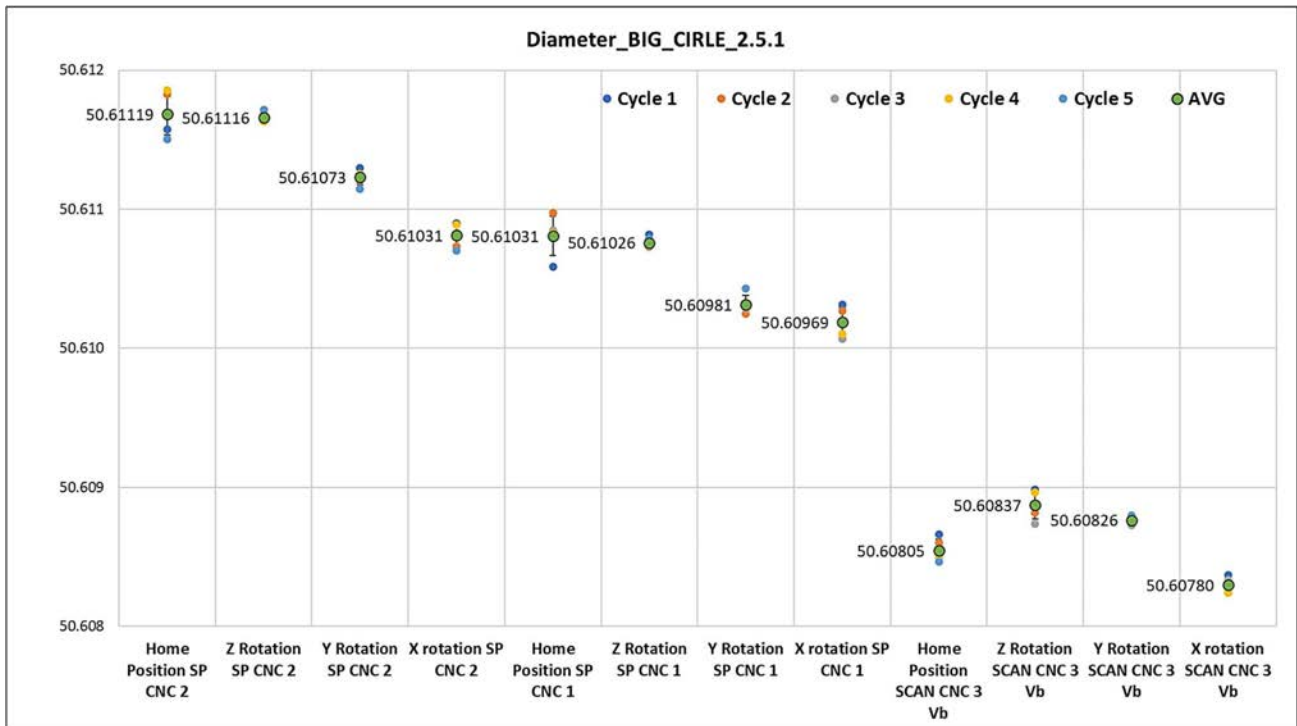
I dati raccolti seguendo il metodo delle *multiple measurement strategies*, sono stati elaborati coerentemente con le indicazioni fornite dal progetto EUCoM per la stima dell'incertezza di misura. Inoltre con i dati ottenuti sono state fatte delle analisi di confronto con i risultati ottenuti da altri partner del progetto.

Nel seguito sono riportati grafici riportanti i risultati delle misurazioni effettuate espressi in *mm*, se non diversamente specificato.

### ***5.1 Connecting rod: Analisi di ripetibilità dei risultati sperimentali***

Alla luce dei dati raccolti dalle misurazioni con le diverse strategie di misura e differenti orientazioni del componente, si può fare una prima analisi sulla ripetibilità dei risultati che sarà alla base della convalida del metodo.

Le diverse strategie di misura utilizzate (CNC 1, CNC 2 e CNC 3) sono state messe a confronto, come di seguito riportato:



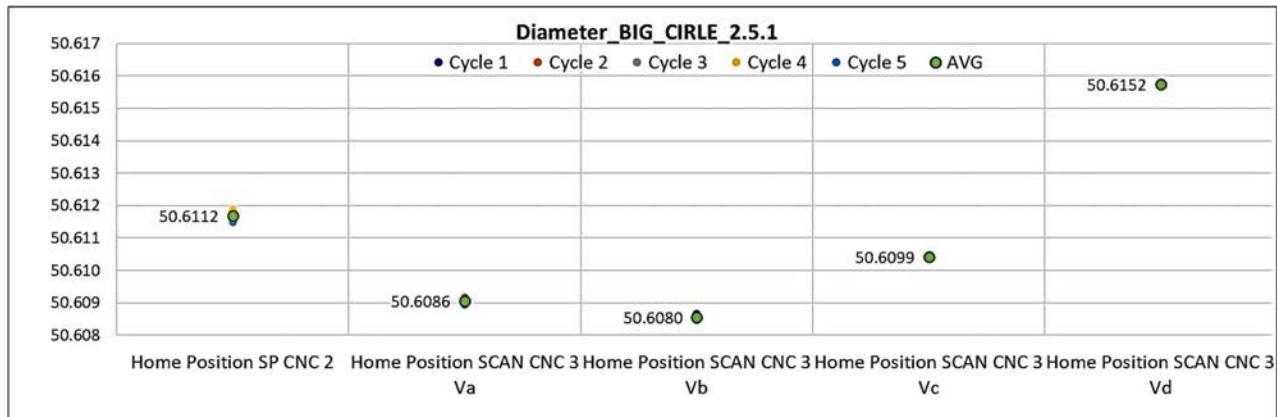
**Grafico 5.1:** analisi di ripetibilità nelle 4 orientazioni per le diverse strategie di misurazione

La caratteristica presa in considerazione per l'analisi, riportata nel Grafico 5.1, rappresenta il diametro al piede di biella. I risultati ottenuti evidenziano un'ottima ripetibilità in ogni orientazione. Per ogni strategia di misura la variabilità dei risultati di tutte e 4 le posizioni è sempre all'interno del range di 1  $\mu\text{m}$ , quindi una buona condizione per procedere con il metodo *multiple measurement strategies*. Anche confrontando le strategie a punti singoli con quella in scansione si ha un range compreso all'interno dei 4  $\mu\text{m}$ , quindi una buona ripetibilità e un'ulteriore indice che evidenzia la buona validità del metodo.

Per lo stesso misurando si può analizzare la ripetibilità dei risultati di misura confrontando i dati sperimentali nella stessa orientazione, la home position, in funzione delle diverse velocità di scansione e rispetto alla strategia a punti singoli. Questo test, svolto per gli stessi misurandi previsti dal measurement plan del progetto EUCoM, sull'effetto della velocità di scansione non è previsto all'interno della strategia di misura del progetto, in quanto non prevede di considerare questo aspetto relativo alla velocità di scansione. Tuttavia, la scansione è largamente utilizzata nella pratica industriale per ridurre i tempi legati alle misurazioni, quindi il metodo proposto da EUCoM nato per facilitare la valutazione dell'incertezza in ambito industriale, dovrebbe tenere conto degli effetti della velocità di scansione sul risultato di misura.

Con riferimento alla tabella 4.5 del capitolo precedente che riporta le velocità di scansione utilizzate, si può osservare dal Grafico 5.2 come i valori delle misurazioni per le singole velocità,

siano praticamente sovrapposti e corrispondenti al valore medio, indice di un'ottima ripetibilità. Nel passaggio da una velocità di scansione ad un'altra si nota un'influenza di quest'ultima non trascurabile nei risultati considerati complessivamente.



**Grafico 5.2:** analisi di ripetibilità per le diverse velocità di scansione e a punti singoli

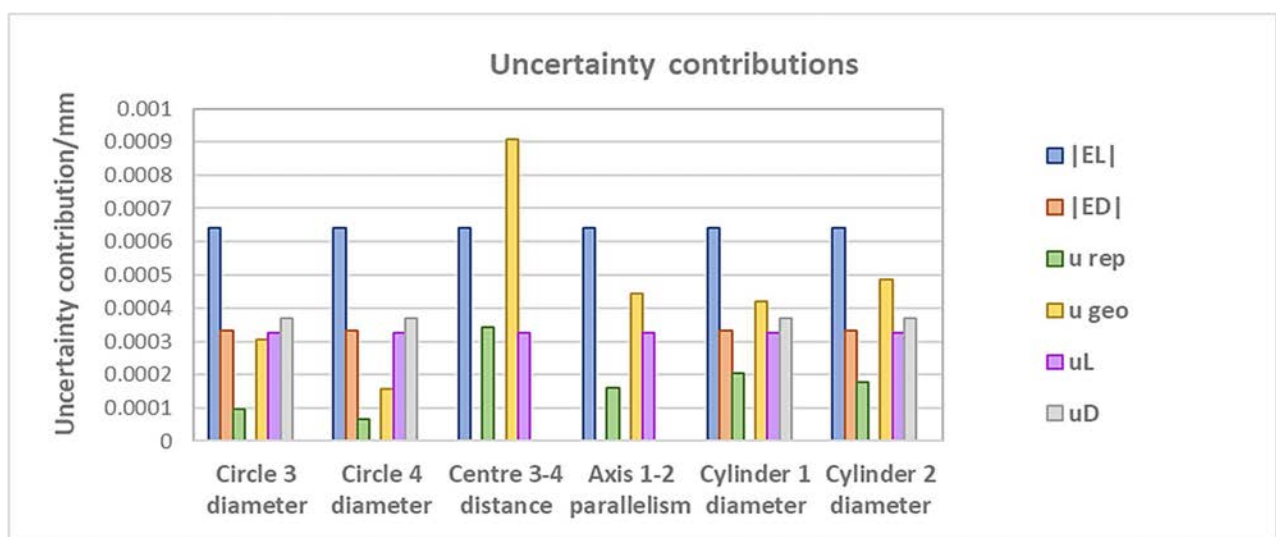
Questo è dovuto inevitabilmente alle prestazioni dinamiche della CMM che ne limitano l'accuratezza della misurazione a velocità di scansione più elevate, creando una sorta di barriera alla misurazione rapida. La modalità a scansione è diversa da quella a punti singoli in quanto la macchina risulta sempre sotto carico inerziale. Questo porta a deflessioni nella struttura che sono molto difficili da prevedere.

Come si può vedere del grafico 5.2 i sistemi di scansione raggiungono un grado di precisione maggiore muovendosi più lentamente. Nel passaggio dalla velocità più bassa a quella più alta ci sono circa 70 µm di variazione.

Quando si misurano punti discreti, queste forze inerziali sono tipicamente trascurabili. Nella scansione, l'accelerazione e quindi i carichi inerziali sono sempre presenti. All'aumentare della velocità, anche le accelerazioni aumentano, ma molto più rapidamente, infatti esse variano con il quadrato della velocità di scansione su una traiettoria curva come nel caso del misurando in esame, con conseguenze anche sulla flessione da parte del tastatore. Per questo motivo come si può vedere dal grafico le misure del diametro tendono ad aumentare con la velocità di scansione. In conclusione quindi, possiamo accettare i risultati delle prime 3 velocità, scartando di sicuro l'ultima velocità più elevata. Per cui possiamo considerare la velocità Vb come rappresentativa, e procedere con il metodo.

### 5.1.2 Confronto dei risultati sperimentali

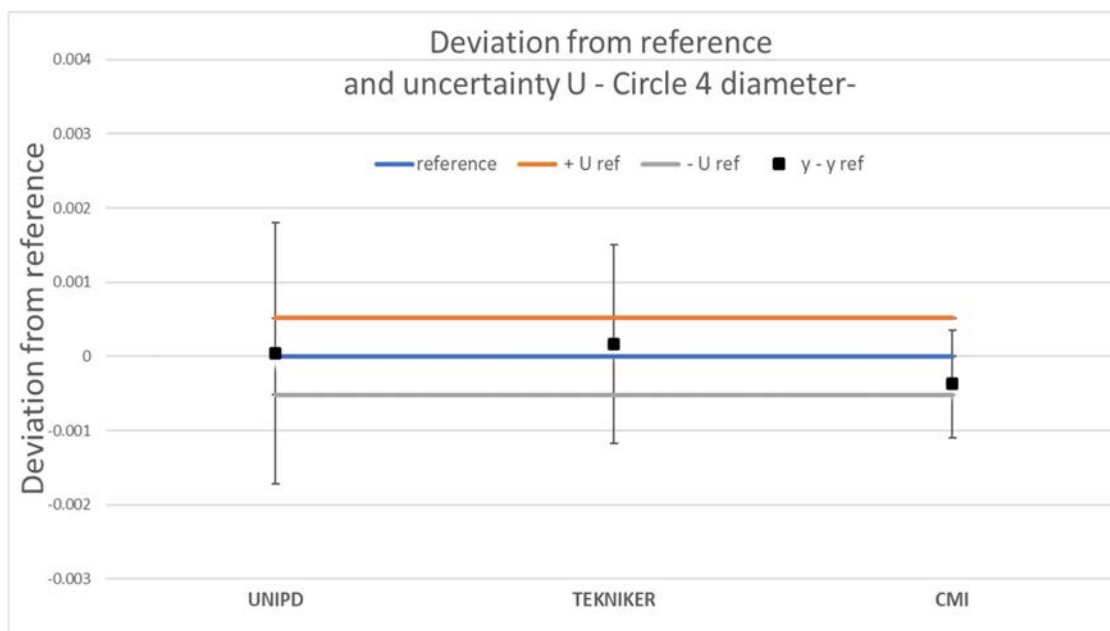
Con i dati a disposizione di altri due partner del progetto è possibile mettere a confronto i risultati per poter giungere alla validazione di questo metodo. Ricordiamo che la formula generale elaborata dal progetto EUCoM per determinare il valore d'incertezza è costituita da numerosi contributi combinati tra loro. Per adeguarsi alla valutazione dell'incertezza svolta dal Tekniker e dal CMI (Czech Metrology Institute) e quindi per poter svolgere un equo confronto, nella formula complessiva dell'incertezza è stato trascurato il contributo relativo alla temperatura.



**Grafico 5.3:** contributi di incertezza per ogni misurando

Dal Grafico 5.3 è possibile confrontare i singoli contributi di incertezza per ogni misurando. Il contributo più significativo è relativo *all'errore medio di scala  $E_L$*  nella regione d'interesse della macchina, ottenuto dalla misurazione del campione di lunghezza. In un misurando specifico, la distanza tra i centri del cerchio 3 e del cerchio 4, prevale il contributo *d'incertezza derivante dagli errori della geometria della CMM  $u_{geo}$* . Una possibile causa dovuta a questo potrebbe essere dovuta al fatto che la distanza non è misurata ma calcolata sulla base di altre caratteristiche misurate, quali i cerchi dei due cilindri, che possono influenzare la misura e quindi l'incertezza caratteristica per quel misurando.

Si possono andare a confrontare i risultati di misura di ogni singolo misurando ottenuti dal Tekniker e dal CMI, in modo da fare delle valutazioni riguardanti la validazione del metodo.



Circle 4 diameter	reference	- U ref	+ U ref	y - y ref	U	En
UNIPD	0	-0.00052	0.00052	0.00004	0.00176	0.02
TEKNIKER	0	-0.00052	0.00052	0.00016	0.00134	0.11
CMI	0	-0.00052	0.00052	-0.00037	0.00073	0.42

**Grafico 5.4:** confronto tra UNIPD-TEKNIKER-CMI per uno specifico misurando

Una prima considerazione da fare, che può avere sicuramente un'influenza sulle misurazioni effettuate, è relativa alle diverse prestazioni delle macchine di misura a coordinate CMM che ogni partner dispone.

Questo aspetto risulta evidente se confrontiamo alcuni misurandi, come riportato nel grafico 5.4, in cui è rappresentata la deviazione, espressa in [mm], dal valore di riferimento calibrato (y-y ref) con il relativo intervallo di incertezza calcolato

$$U = k \sqrt{E_L^2 + E_D^2 + E_{D,Loc}^2 + \frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2 + u_D^2 + u_{D,Loc}^2 + u_{temp}^2}$$

Come riportato nel grafico, nel caso dei risultati ottenuti dall'UNIPD, la banda di incertezza calcolata risulta maggiore delle altre due relative all'incertezza del misurando ottenuta dal TEKNIKER e dal CMI, principalmente dovuta alle prestazioni della CMM a disposizione. Tuttavia il risultato si trova all'interno del range definito dall'intervallo d'incertezza di riferimento (+U ref; -U ref) e comparabile con gli altri due partner.

### **5.1.3 Valutazione dell'effetto della temperatura come contributo d'incertezza $u_{temp}$**

Finora non è stato considerato l'effetto della temperatura nel calcolo dell'incertezza, per poter confrontare i risultati di misurazione ottenuti dall'UNIPD con quelli del Tekniker e del CMI. In realtà il progetto prevede di considerare anche questo aspetto, che è fondamentale per tenere conto della dilatazione termica che influisce sul pezzo da misurare, sulla macchina, sui campioni di lunghezza e sulla sfera. Ipotizziamo quindi di considerare l'effetto della temperatura, in modo da definire e confrontare questo contributo di incertezza con gli altri termini per capire se è accettabile trascurarlo, infine quanto influisce sul valore dell'incertezza totale.

Per la valutazione della procedura che consente di determinare il contributo di incertezza che deriva dalla temperatura  $u_{temp}$  si fa riferimento alla normativa ISO-DTS 15530-2 allegato A. Sono necessarie delle misure di temperatura registrate durante la sperimentazione e la conoscenza dei coefficienti di dilatazione termica della CMM, del blocchetto di riscontro e della biella.

Seguendo il procedimento indicato nei documenti "WP1 Uncertainty Evaluation", forniti dal progetto, il contributo  $u_{temp}$  è costituito da:

- $u_{tempW}$  è l'incertezza con cui viene corretta la temperatura effettiva delle scale e la temperatura effettiva del pezzo durante le sue misurazioni
- $u_{tempN}$  e  $u_{tempD}$  sono l'incertezza con cui vengono corretti la temperatura effettiva delle scale e la temperatura effettiva dello standard di lunghezza e della sfera durante le misurazioni.

Questi saranno poi combinati per ottenere il contributo finale:

$$u_{temp}^2 = u_{tempW}^2 + u_{tempN}^2 + u_{tempD}^2$$

Di seguito viene riportata la procedura per determinare questi contributi di incertezza e i parametri relativi alla temperatura sono riassunti nelle tabelle che seguono:

CTE_W	1.10E-05	/K	coefficiente di dilatazione termica del pezzo
u_CTE_W	1.73E-06	/K	incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica del pezzo
CTE_M	5.00E-07	/K	coefficiente di dilatazione termica della macchina
u_CTE_M	2.89E-07	/K	incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica della macchina
u_(T_W_cal)	0.02	K	incertezza estesa del termometro (riferita al pezzo)
u_(T_M_cal)	0.01	K	incertezza estesa del termometro (riferita alla macchina)
Meas_value	50.610018	mm	valore medio del misurando
T_W	20.34	°C	temperatura del pezzo
T_M	20.42	°C	temperatura della macchina
T_LenStd	20	°C	temperatura di riferimento
u_Temp_W	0.00003	mm	contributo di incertezza relativo al pezzo

**Tabella 5.2:** Parametri relativi alla temperatura per determinare il contributo di incertezza sul pezzo  $u_{tempW}$

$$u_{tempW} = L * [(u_{TM\ trans}^2 + u_{TM\ cal}^2)\alpha_M^2 + (u_{TW\ trans}^2 + u_{TW\ cal}^2)\alpha_W^2 + (u_{\alpha M}(T_M - 20^\circ C))^2 + (u_{\alpha W}(T_W - 20^\circ C))^2]^{1/2}$$

CTE_M	5.00E-07	/K	coefficiente di dilatazione termica della macchina
u_CTE_M	2.89E-07	/K	incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica della macchina
CTE_N	1.10E-05	/K	coefficiente di dilatazione termica del campione di lunghezza
u_CTE_N	5.77E-07	/K	incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica del campione di lunghezza
u_(T_N_cal)	0.02	K	incertezza estesa del termometro (riferita al campione)
u_(T_M_cal)	0.01	K	incertezza estesa del termometro (riferita alla macchina)
L_calstd	100.0001	mm	valore di calibrazione del campione di lunghezza
T_N	20.34	°C	temperatura del campione di lunghezza
T_M	20.98	°C	temperatura della macchina
T_LenStd	20	°C	temperatura di riferimento
u_Temp_N	0.00004	mm	contributo di incertezza relativo al campione di lunghezza

**Tabella 5.3:** Parametri relativi alla temperatura per determinare il contributo di incertezza sul campione di lunghezza  $u_{tempN}$

$$u_{tempN} = L * [(u_{TM\ trans}^2 + u_{TM\ cal}^2)\alpha_M^2 + (u_{TN\ trans}^2 + u_{TN\ cal}^2)\alpha_N^2 + (u_{\alpha M}(T_M - 20^\circ C))^2 + (u_{\alpha N}(T_N - 20^\circ C))^2]^{1/2}$$

CTE_M	5.00E-07	/K	coefficiente di dilatazione termica della macchina
u_CTE_M	2.89E-07	/K	incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica della macchina
CTE_D	5.50E-06	/K	coefficiente di dilatazione termica della sfera
u_CTE_D	5.77E-07	/K	incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica della sfera
u_(T_N_cal)	0.02	K	incertezza estesa del termometro (riferita al campione)
u_(T_M_cal)	0.01	K	incertezza estesa del termometro (riferita alla macchina)
D_calstd	29.99884	mm	valore di calibrazione del diametro della sfera
T_D	19.99	°C	temperatura della sfera
T_M	20.43	°C	temperatura della macchina
T_LenStd	20	°C	temperatura di riferimento
u_Temp_D	0.000005	mm	contributo di incertezza relativo al diametro della sfera

**Tabella 5.4:** Parametri relativi alla temperatura per determinare il contributo di incertezza sulla sfera

$$u_{tempD} = D * [(u_{T M trans}^2 + u_{T M cal}^2)\alpha_M^2 + (u_{T N trans}^2 + u_{T N cal}^2)\alpha_D^2 + (u_{\alpha M}(T_M - 20^\circ C))^2 + (u_{\alpha D}(T_D - 20^\circ C))^2]^{1/2}$$

Dove i singoli termini delle tre equazioni precedenti rappresentano:

$u_{T M trans}$  è il valore dell'incertezza tipo del trasferimento di temperatura macchina-termometro

$u_{T W trans}$  è il valore dell'incertezza tipo del trasferimento di temperatura pezzo-termometro

$u_{T N trans}$  è il valore dell'incertezza tipo del trasferimento di temperatura standard-termometro

- $u_{T M cal}$  è il valore dell'incertezza estesa del termometro (riferita alla macchina)
- $u_{T W cal}$  è il valore dell'incertezza estesa del termometro (riferita al pezzo)
- $u_{T N trans}$  è il valore dell'incertezza estesa del termometro (riferita al campione)
- $\alpha_M^2$  è il coefficiente di dilatazione termica della macchina
- $\alpha_W^2$  è il coefficiente di dilatazione termica del pezzo
- $\alpha_N^2$  è il coefficiente di dilatazione termica al campione
- $T_M$  è il valore della temperatura (in °C) della macchina
- $T_W$  è il valore della temperatura (in °C) del pezzo

- $T_N$  è il valore della temperatura (in °C) del campione
- $u_{\alpha M}$  è il valore dell'incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica della macchina
- $u_{\alpha W}$  è il valore dell'incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica del pezzo
- $u_{\alpha N}$  è il valore dell'incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica dello standard

Noti i singoli contributi il valore di incertezza finale relativo alla temperatura risulta:

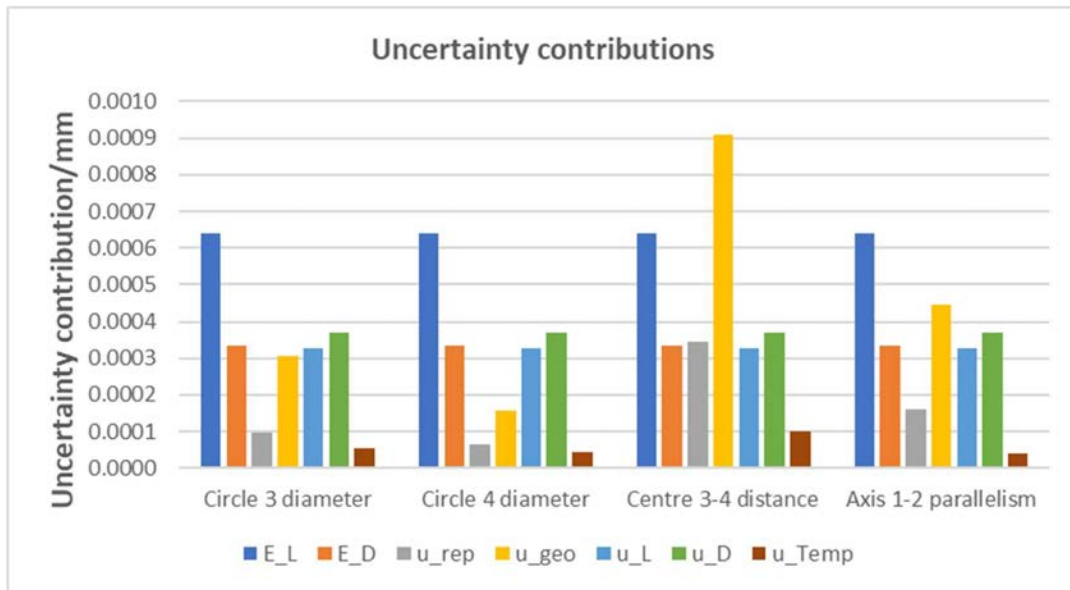
u_Temp_W	0.00003	mm
u_Temp_L	0.00004	mm
u_Temp_D	0.000005	mm
u_Temp	0.000052	mm

**Tabella 5.5:** Riepilogo contributi di incertezza correlati alla temperatura e contributo finale

	E_L	E_D	u_rep	u_geo	u_L	u_D	u_Temp	U_meas
Circle 3 diameter	0.000 64	0.000 33	0.000 10	0.000 31	0.000 33	0.000 37	0.000052	0.001 78
Circle 4 diameter	0.000 64	0.000 33	0.000 07	0.000 16	0.000 33	0.000 37	0.000043	0.001 76
Centre 3-4 distance	0.000 64	0.000 33	0.000 34	0.000 91	0.000 33	0.000 37	0.000099	0.002 00
Axis 1-2 parallelism	0.000 64	0.000 33	0.000 16	0.000 44	0.000 33	0.000 37	0.000041	0.001 81

**Tabella 5.6:** riepilogo dei singoli contributi d'incertezza calcolati per i misurandi

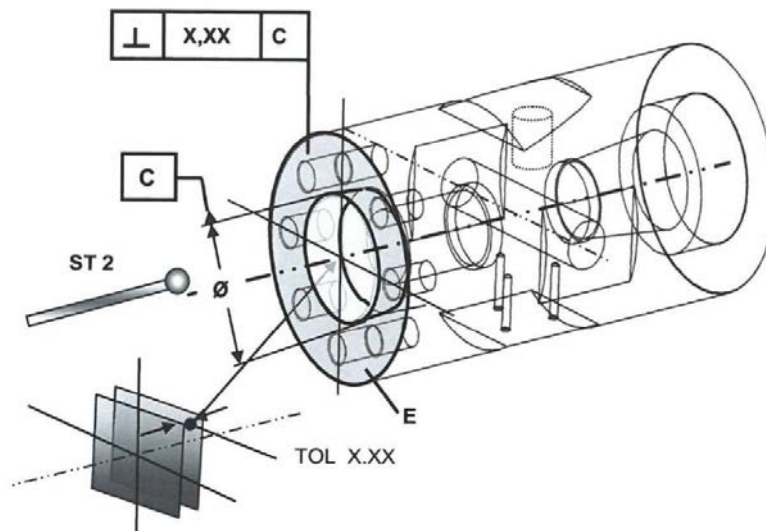
Con le Tabelle 5.5 e 5.6 si cerca di riassumere tutti quei contributi di incertezza che, previsti dal progetto EUCoM, consentono di determinare il valore finale dell'incertezza di misura (riportata nell'ultima colonna della tabella 5.6). Da notare che la temperatura è sempre almeno di un ordine di grandezza più piccola di tutti gli altri termini. Ma questo si può osservare meglio dal Grafico 5.5 che riporta i singoli contributi di incertezza e l'effetto della temperatura è il fattore che influisce meno nella sperimentazione, tuttavia non essendo un termine costante in funzione del tipo di misurando, sarebbe idoneo per completezza considerarlo nella valutazione complessiva.



**Grafico 5.5:** confronto tra i singoli contributi di incertezza

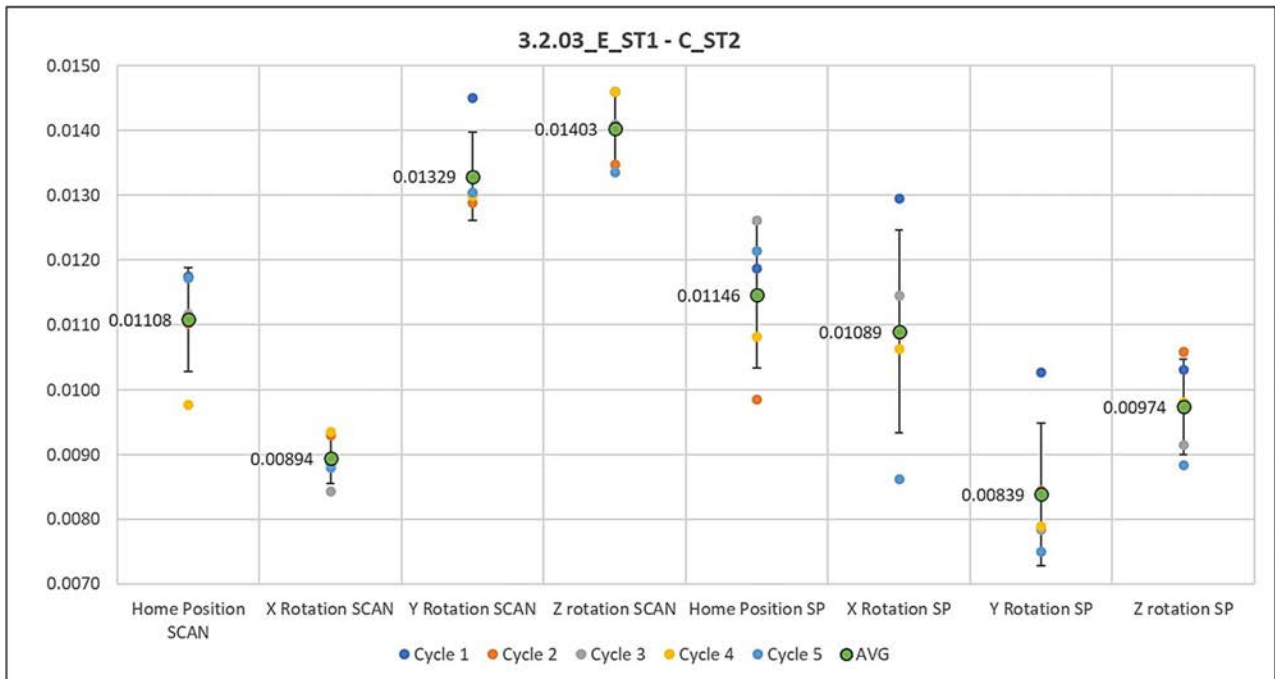
## ***5.2 Multi Feature Check: Analisi di ripetibilità dei risultati sperimentali***

Alla luce dei dati raccolti dalle misurazioni con le due strategie di misura (SCAN MODE e SINGLE POINTS (SP) MODE) e differenti orientazioni del componente, si può fare una prima analisi sulla ripetibilità dei risultati che sarà alla base per la convalida del metodo. Inoltre, ci consente un confronto tra la modalità a scansione e a punti singoli. Per il MFC, di cui stiamo trattando la versione low quality in cui sono presenti consapevolmente errori di forma, le caratteristiche sono in numero considerevole rispetto al caso precedente della biella, per cui si procederà ad analizzare i misurandi più rilevanti dal punto di vista delle osservazioni sperimentali.

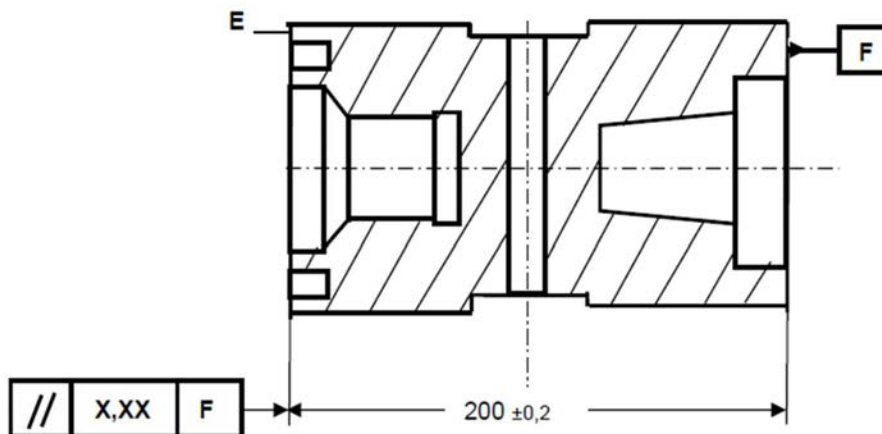


**Figura 5.1:** 3.2.03\_E\_ST1-C\_ST2: *perpendicolarità del piano E con l'asse del cilindro C*

La caratteristica 3.2.03\_E\_ST1 - C\_ST2 che rappresenta la perpendicolarità del piano E rispetto all'asse del cilindro C, riportata in Figura 5.1, è stata presa in esame in quanto i risultati della sperimentazione, riportati nel Grafico 5.7, mostrano una ripetibilità generale compresa in un range di circa 7  $\mu\text{m}$ . Da notare che per la strategia di misura a punti singoli si nota una variabilità più marcata dei risultati nelle singole orientazioni, a cui si associa una deviazione standard più grande di quella ottenuta in modalità di scansione dove i punti tastati sono dell'ordine delle migliaia mentre nella strategia a punti singoli possiamo contare alcune decine di punti. Trattasi di un misurando complesso quello in esame e tenendo presente che il MFC è la versione low quality in cui sono presenti consapevolmente errori di forma, i risultati ottenuti possono essere considerati accettabili.

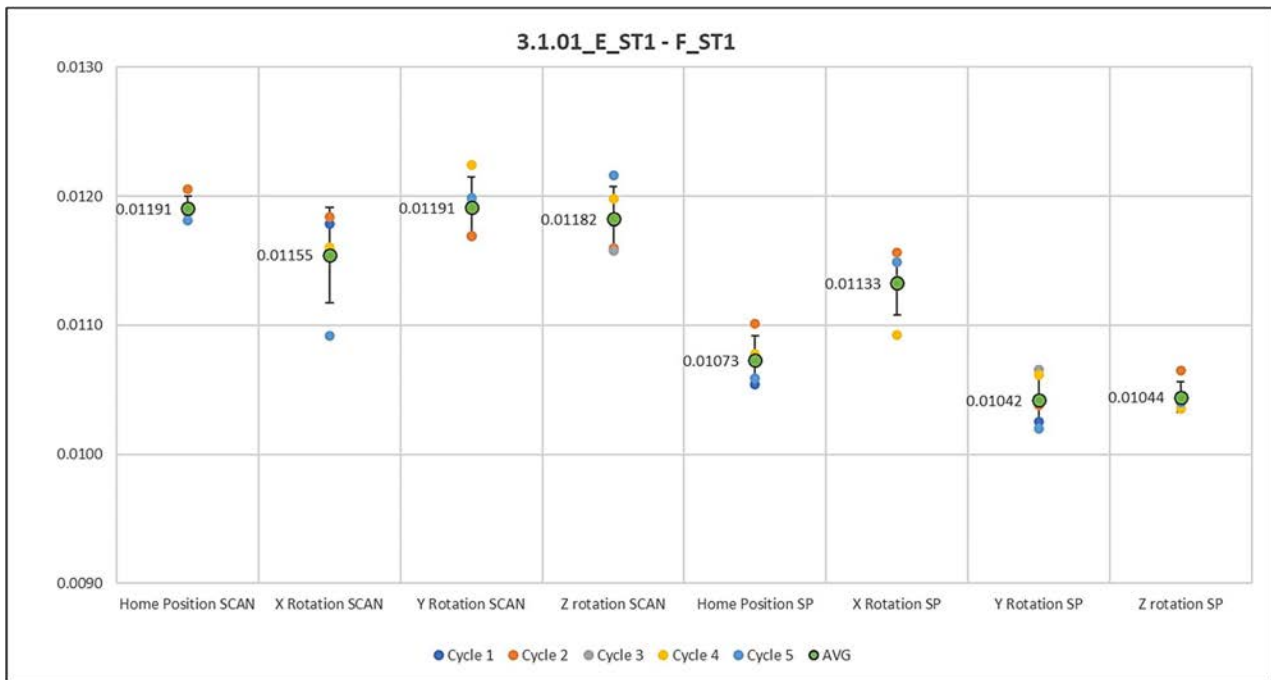


**Grafico 5.7:** analisi di ripetibilità nelle 4 orientazioni per le strategie di misurazione a scansione e a punti singoli

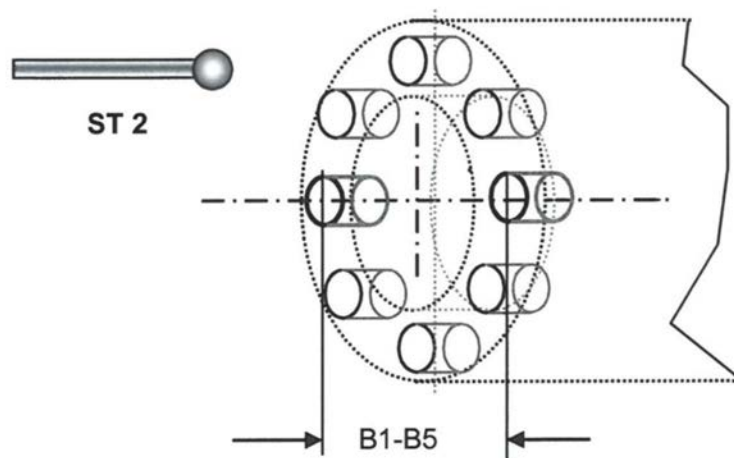


**Figura 5.2:** 3.1.01\_E\_ST1-F\_ST1: parallelismo del piano E con il piano F

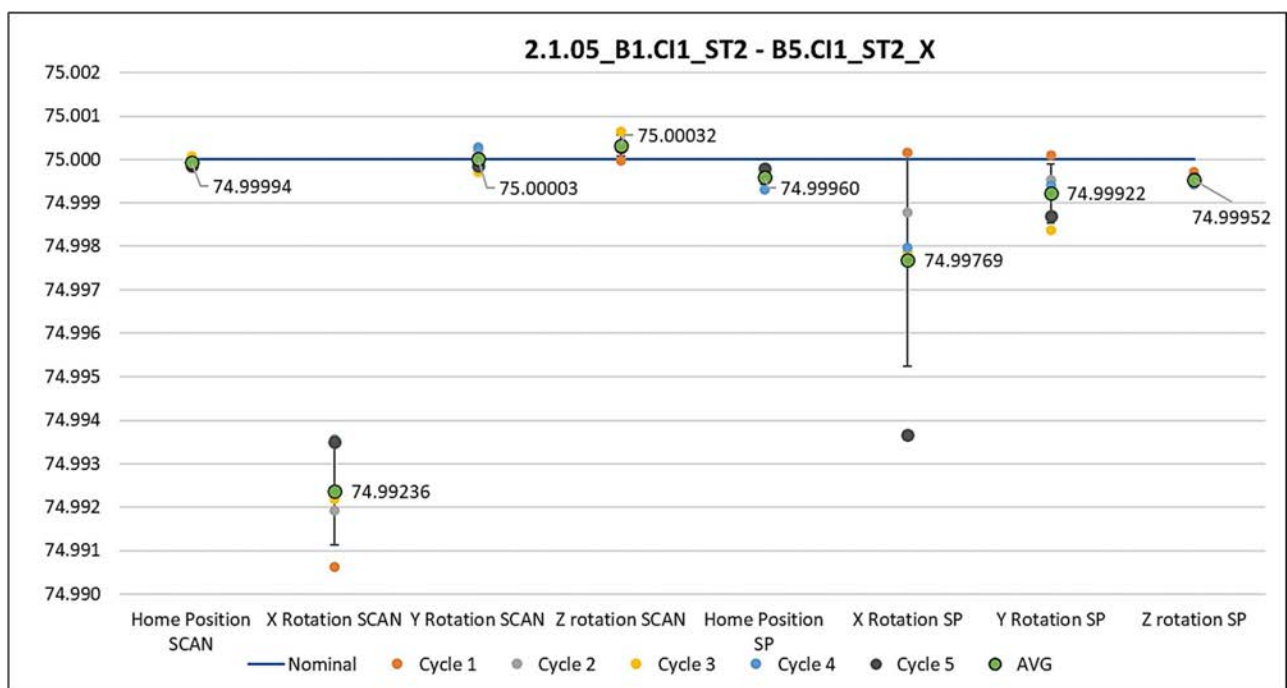
La caratteristica 3.1.01\_E\_ST1-F\_ST1 che rappresenta il parallelismo del piano E con il piano F, riportata in Figura 5.2, è stata presa in esame in quanto i risultati della sperimentazione, riportati nel Grafico 5.8, mostrano una ripetibilità generale compresa in un range di soli 2  $\mu\text{m}$ . In entrambe le strategie i risultati mostrano un'ottima ripetibilità, e se confrontati presentano una variabilità minima.



**Grafico 5.8:** analisi di ripetibilità nelle 4 orientazioni per le strategie di misurazione a scansione e a punti singoli



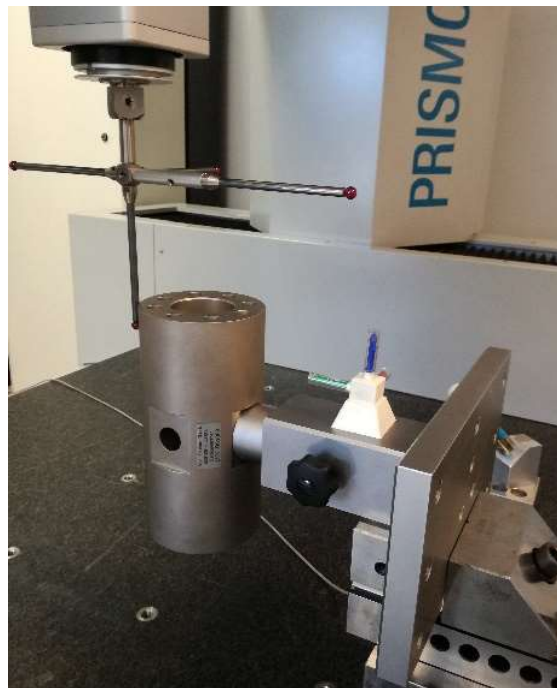
**Figura 5.3:** 2.1.05\_B1.CI1\_ST2 - B5.CI1\_ST2: distanza tra i due fori B1-B5



**Grafico 5.9:** analisi di ripetibilità nelle 4 orientazioni per le strategie di misurazione a scansione e a punti singoli

Un'altra caratteristica per cui fare delle considerazioni alla luce dei risultati è la 2.1.05\_B1.CI1\_ST2 - B5.CI1\_ST2, riportata in Figura 5.3, che rappresenta la distanza tra i due fori B1-B5. Nel Grafico 5.9 è riportata l'analisi di ripetibilità come nel caso precedente. Se si immagina di escludere

l'orientazione X sia per la strategia in scansione che a punti singoli, i risultati sperimentali sono contenuti in un range di soli 3  $\mu\text{m}$  di variabilità, risultato che darebbe ottimi riscontri come base per la validazione del metodo delle *multiple measurement strategies*. Quindi l'incoerenza dei risultati ottenuti per la X position deve essere valutata considerando altri fattori di influenza. In questa orientazione il MFC è fissato a sbalzo, come si può vedere in Figura 5.4, considerando il peso del componente e il tipo di bloccaggio utilizzato tutto ciò potrebbe influire nella ripetibilità dei risultati. Da notare che la misurazione comporta l'uso di un tastatore verticale che ha una lunghezza considerevole (114 mm più il sistema di fissaggio), questo potrebbe portare la macchina a lavorare in direzione del suo asse verticale Z al di fuori del volume di misura inizialmente immaginato in cui potrebbero esserci errori di scala della CMM non ben definiti. Un'ultima considerazione può essere fatta riguardo ai tastatori raccomandati, che dispongono di un diametro troppo grande e non adatto a misurare questi fori di diametro paragonabile a quello del tastatore.

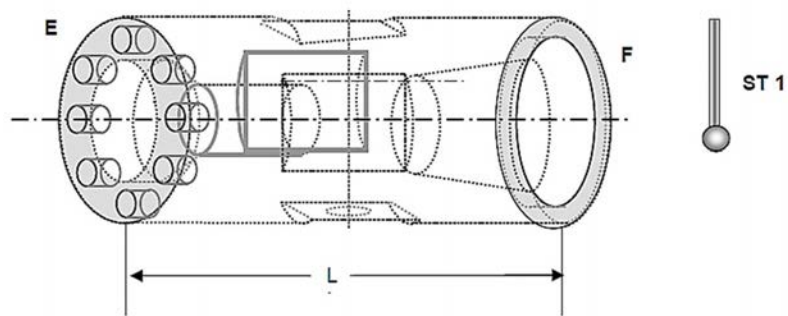


**Figura 5.4:** MFC orientato nella X position, sistema di fissaggio utilizzato

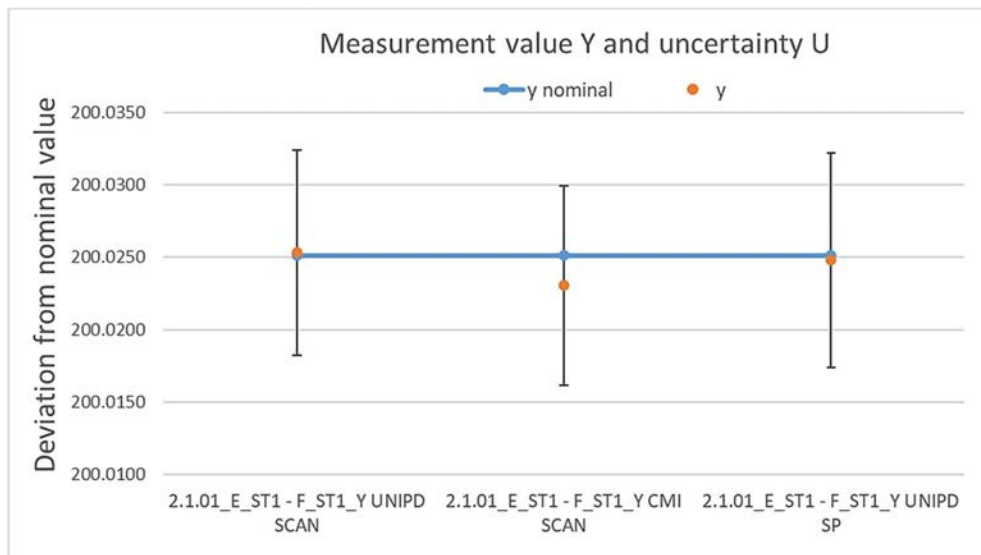
### **5.2.2 Confronto dei risultati sperimentali**

Per il MFC disponiamo oltre ai nostri risultati sperimentali dell'UNIPD, anche di quelli ottenuti dal DTI (Danish Technological Institute). Possiamo quindi confrontare i risultati in modo da fare

ulteriori valutazioni, come fatto precedentemente per la biella, per rafforzare la validazione del metodo proposto dal progetto EUCom. La procedura di misura per il MFC prevede una gran quantità di misurandi da analizzare. Per semplicità sarà svolta l'analisi di valutazione dell'incertezza prendendo in considerazione solo alcuni di essi. Nelle Fig 5.4 e 5.5 sono schematizzate le caratteristiche prese in riferimento, rispettivamente la distanza tra il piano E e il piano F lungo l'asse del cilindro, quindi la lunghezza totale del MFC, e il diametro del cilindro interno C. Nei Grafici 5.9 e 5.10 sono riportati i valori misurati con la rispettiva banda d'incertezza. Ne risulta una buona correlazione tra i risultati dell'UNIPD, nelle due strategie di misura a punti singoli e scansione, con quelli del DTI.

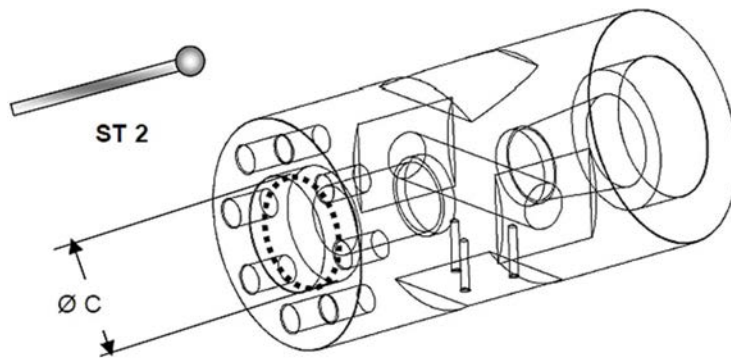


**Figura 5.4:** 2.1.01\_E\_ST1 - F\_ST1\_Y: distanza del piano E e del piano F lungo l'asse del cilindro

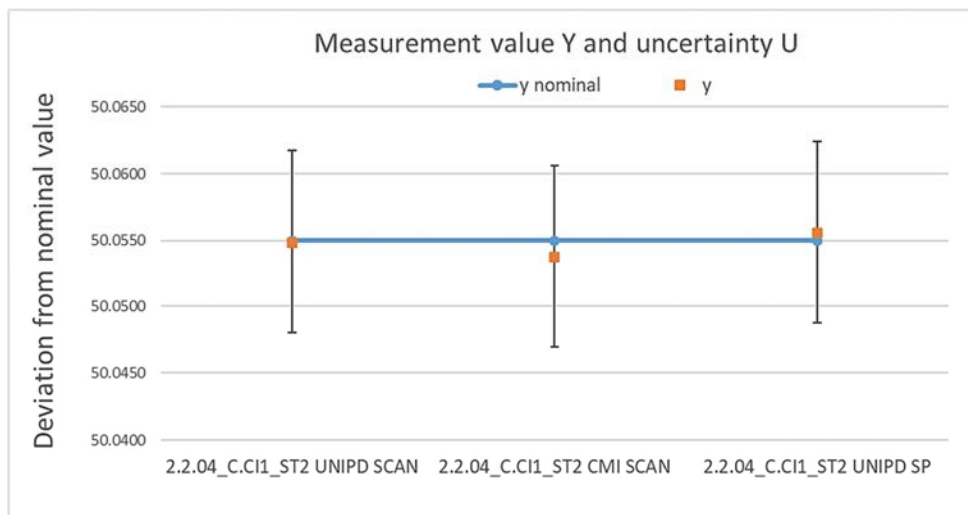


Measured feature	Nominal value	Measurement value	Expanded combined standard uncertainty
	y nominal	y	U
2.1.01_E_ST1 - F_ST1_Y UNIPD SCAN	200.0251	200.0253	0.007 09
2.1.01_E_ST1 - F_ST1_Y CMI SCAN	200.0251	200.0230	0.006 89
2.1.01_E_ST1 - F_ST1_Y UNIPD SP	200.0251	200.0248	0.007 42

**Grafico 5.9:** confronto tra UNIPD-DTI per uno specifico misurando con le diverse strategie di misura



**Figura 5.5:** 2.2.04\_C.CI1\_ST2: diametro del cilindro C misurato in una sezione circolare



Measured feature	Nominal value	Measurement value	Expanded combined standard uncertainty
	y nominal	y	U
2.2.04_C.CI1_ST2 UNIPD SCAN	50.0550	50.0549	0.006 85
2.2.04_C.CI1_ST2 CMI SCAN	50.0550	50.0538	0.006 84
2.2.04_C.CI1_ST2 UNIPD SP	50.0550	50.0556	0.006 84

**Grafico 5.10:** confronto tra UNIPD-DTI per uno specifico misurando con le diverse strategie di misura

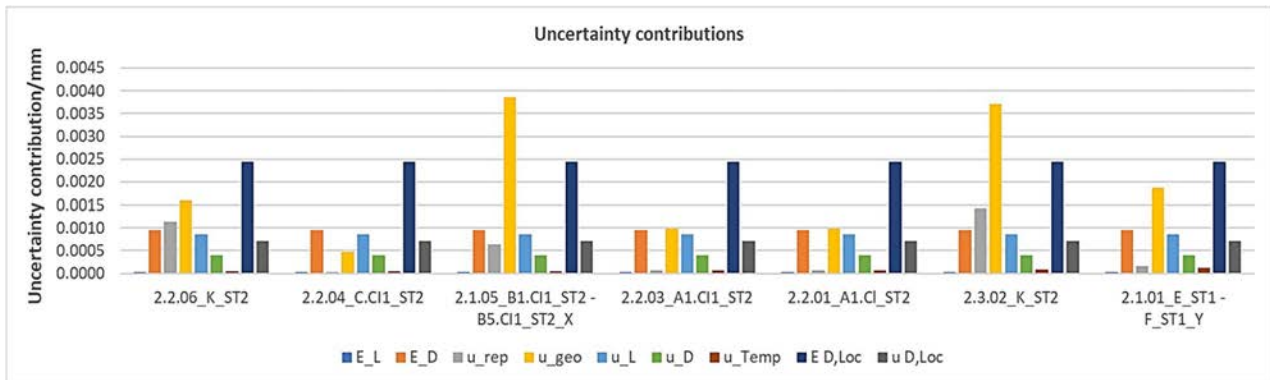
Nel Grafico 5.11 sono rappresentati, per i soli misurandi di dimensioni (size), i diversi contributi di incertezza considerati. Diversamente dal caso della biella, nello studio del MFC deve essere preso in considerazione il contributo di incertezza  $u_{PrbLoc}$  che deriva dall'errore medio di qualifica della posizione del tastatore  $E_{PrbLoc}$ . Infatti, per ogni misurazione svolta nelle diverse orientazioni sono stati utilizzati sempre due tastatori, condizione che prevede di calcolare l'errore  $E_{PrbLoc}$  con i valori dei diametri della sfera minima circoscritta che comprende i centri delle sfere derivanti dalle acquisizioni dei punti misurati con il rispettivo tastatore in tutte le ripetizioni. I dati di partenza sono le coordinate dei centri  $L(x)$ ,  $L(y)$  e  $L(z)$ , come riportato in Tabella 4.1. Tramite un codice Matlab fornito dal progetto EUCom è possibile determinare i diametri minimi circoscritti, a cui segue il calcolo dell'errore:

$$E_{PrbLoc} = \frac{1}{n_5} \sum_{i=1}^{n_5} D_{MCS}$$

Rappresenta la media dei diametri calcolati, mentre con  $n_5$  il numero delle ripetizioni di misura. Da cui si determina il contributo di incertezza:

$$u_{PrbLoc}^2 = \frac{|E_{PrbLoc}|}{12}$$

Questo contributo di incertezza risulta, dal Grafico 5.11, essere quello più considerevole. Tuttavia, in due misurandi (2.1.05\_B1.CI1\_ST2 - B5.CI1\_ST2 ovvero la distanza tra i fori B1 - B5 e 2.3.02\_K\_ST2 che rappresenta l'angolo del cono) si osserva un valore del contributo  $u_{geo}$ , derivante dagli errori della geometria della CMM, ben superiore allo stesso termine valutato per gli altri misurandi. Si tratta di un valore incoerente dovuto al problema discusso precedentemente e riportato nel Grafico 5.8 di ripetibilità, in cui è stato registrato un problema nell'orientazione X position, le cui cause sono state già descritte.



**Grafico 5.11:** singoli contributi di incertezza per ogni misurando

### 5.2.3 Valutazione dell'effetto della temperatura come contributo d'incertezza $u_{temp}$

Oggetto di discussione anche nel caso del MFC è stato il contributo di incertezza dovuto alla temperatura  $u_{Temp}$ . Durante la sperimentazione sono state registrate le misure di temperatura e la conoscenza dei coefficienti di dilatazione termica della CMM, del blocchetto di riscontro e del MFC. Seguendo il procedimento indicato da Osamu Sato nei documenti forniti “WP1 Uncertainty Evaluation”, il contributo  $u_{temp}$  è riportato nel Grafico 5.9, da cui si osserva che è uno dei fattori che influisce in modo meno significativo nella sperimentazione. Di seguito è riportata la Tabella 5.5, in cui si vuole riassumere tutti quei contributi di incertezza che, previsti dal progetto EUCoM, consentono di determinare il valore finale dell'incertezza di misura (riportata nell'ultima colonna della tabella). Da notare che la temperatura è sempre almeno di un ordine di grandezza più piccola di tutti gli altri termini, tuttavia non essendo un termine costante in funzione del tipo di misurando, sarebbe idoneo per completezza considerarlo nella valutazione complessiva.

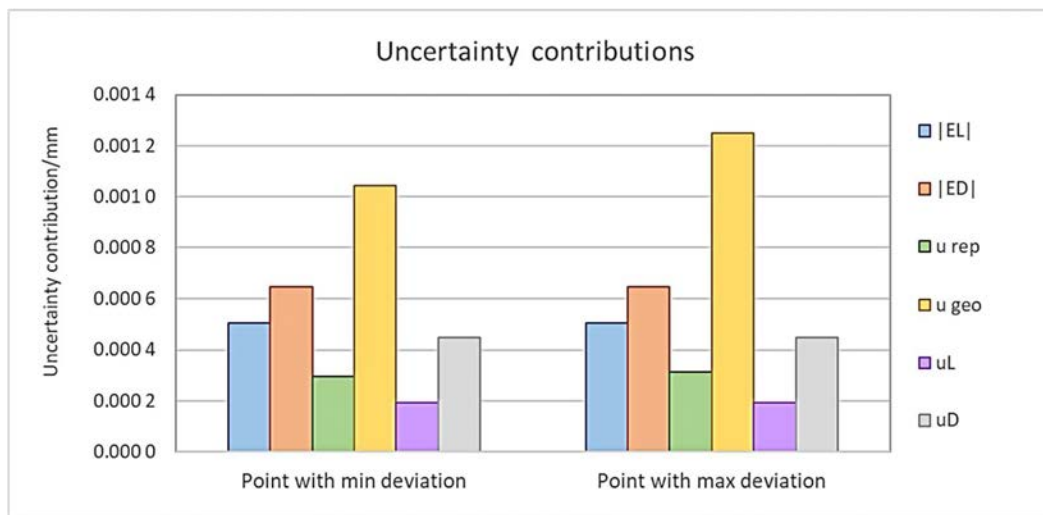
	E_L	E_D	u_rep	u_geo	u_L	u_D	u_Temp	E D,Loc	u D,Loc	U_meas
2.2.06_K_ST2	0.00003	0.00095	0.00114	0.00159	0.00085	0.00040	0.00004	0.00244	0.00070	0.00605
2.2.04_C.CI1_ST2	0.00003	0.00095	0.00004	0.00046	0.00085	0.00040	0.00004	0.00244	0.00070	0.00576
2.1.05_B1.CI1_ST2 - B5.CI1_ST2_X	0.00003	0.00095	0.00064	0.00386	0.00085	0.00040	0.00006	0.00244	0.00070	0.00694
2.2.03_A1.CI1_ST2	0.00003	0.00095	0.00007	0.00099	0.00085	0.00040	0.00007	0.00244	0.00070	0.00583
2.2.01_A1.CI1_ST2	0.00003	0.00095	0.00007	0.00098	0.00085	0.00040	0.00007	0.00244	0.00070	0.00583
2.3.02_K_ST2	0.00003	0.00095	0.00143	0.00371	0.00085	0.00040	0.00008	0.00244	0.00070	0.00696
2.1.01_E_ST1 - F_ST1_Y	0.00003	0.00095	0.00015	0.00187	0.00085	0.00040	0.00013	0.00244	0.00070	0.00604

**Tabella 5.5:** riepilogo dei contributi d'incertezza calcolati e valore finale  $U_{meas}$

### 5.3 Hyperbolic Paraboloid: Analisi dei risultati sperimentali

I dati raccolti seguendo il metodo delle *multiple measurement strategies*, sono stati elaborati seguendo le indicazioni fornite dal progetto EUCoM per la stima dell'incertezza di misura.

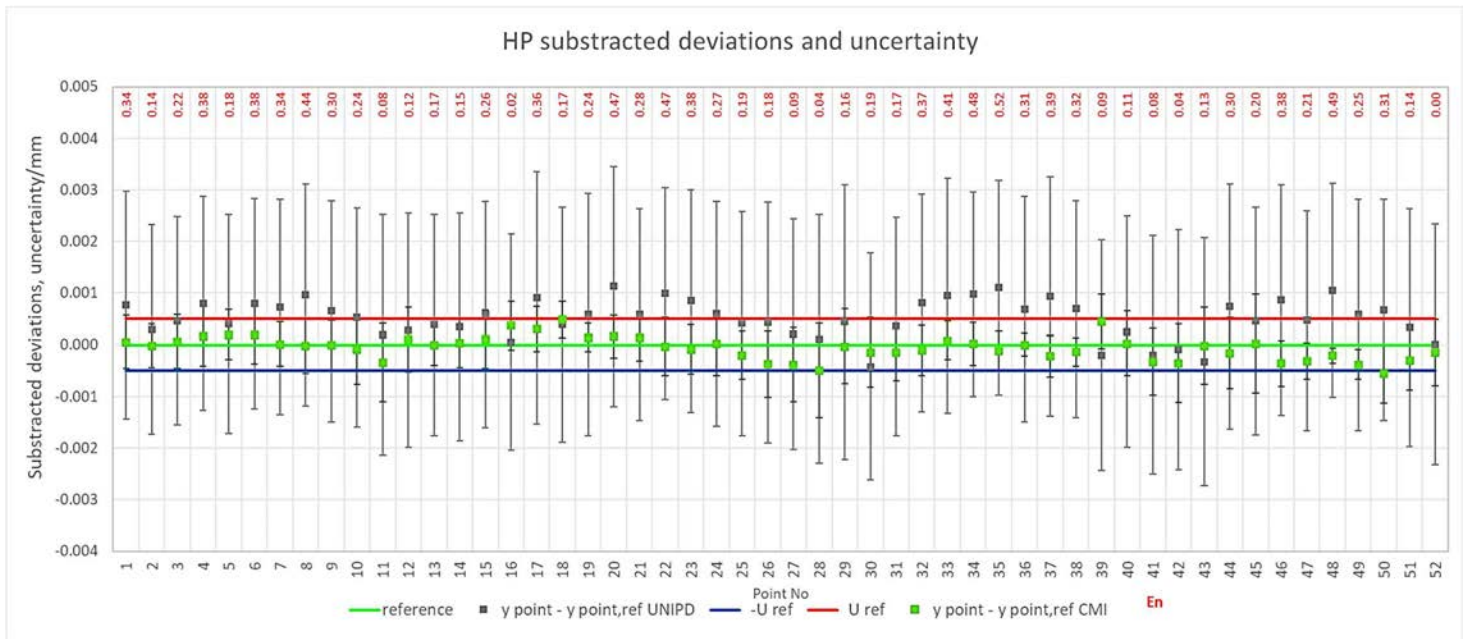
Anche in questo caso, come per la *biella* e per il *Multi Feature Check*, abbiamo a disposizione i dati di un altro partner del progetto, il CMI (Czech Metrology Institute), in questo modo è possibile mettere a confronto i risultati per poter giungere alla validazione di questo metodo. Ricordiamo che la formula generale elaborata dal progetto EUCoM per determinare il valore d'incertezza è costituita da numerosi contributi combinati tra loro. Come già svolto precedentemente, per adeguarsi alla valutazione dell'incertezza svolta dal CMI e quindi per poter svolgere un equo confronto, nella formula complessiva dell'incertezza è stato trascurato il contributo relativo alla temperatura. In ogni caso nelle misurazioni da noi effettuate sono a disposizione i valori di temperatura misurata durante le prove.



**Grafico 5.12:** contributi di incertezza per ogni misurando

Dal Grafico 5.12 è possibile confrontare i singoli contributi di incertezza per ogni misurando. Il contributo più significativo è relativo al *contributo di incertezza tipo derivante dagli errori della geometria della CMM*  $u_{geo}$ . Si tratta di un valore di circa 1  $\mu\text{m}$  che è accettabile considerando la CMM a disposizione.

Dal Grafico 5.13 si possono confrontare i risultati di misura, in termini di deviazione della normale alla superficie dei 52 punti tastati rispetto alla superficie di riferimento data dal CAD, ottenuti con quelli del CMI, in modo da fare delle valutazioni riguardanti la validazione del metodo.



**Grafico 5.13:** valutazione dell'incertezza e della deviazione con confronto tra UNIPD-CMI per i 52 punti misurati

La prima considerazione da fare, che ha sicuramente un'influenza sulle misurazioni effettuate, è relativa al livello di qualità delle macchine di misura a coordinate CMM a disposizione di ogni partner. In questo confronto il riferimento è dato dal CMI, che come già detto dispone della Carl Zeiss Xenos con  $MPE=(0.3+1L) \mu m$ , con la quale sono stati ottenuti i valori tarati. Con riferimento al Grafico 5.13 è lecito aspettarsi dei valori misurati in termini di deviazione della normale all'interno del range definito dall'incertezza del valore tarato. Per quanto riguarda i risultati ottenuti dall'UNIPD alcuni di questi sono fuori dall'intervallo di incertezza del valore tarato, ma sempre inferiore a  $1 \mu m$ . Considerando questi risultati con il relativo intervallo di incertezza calcolato mediante la formula elaborata dal progetto EUCom:

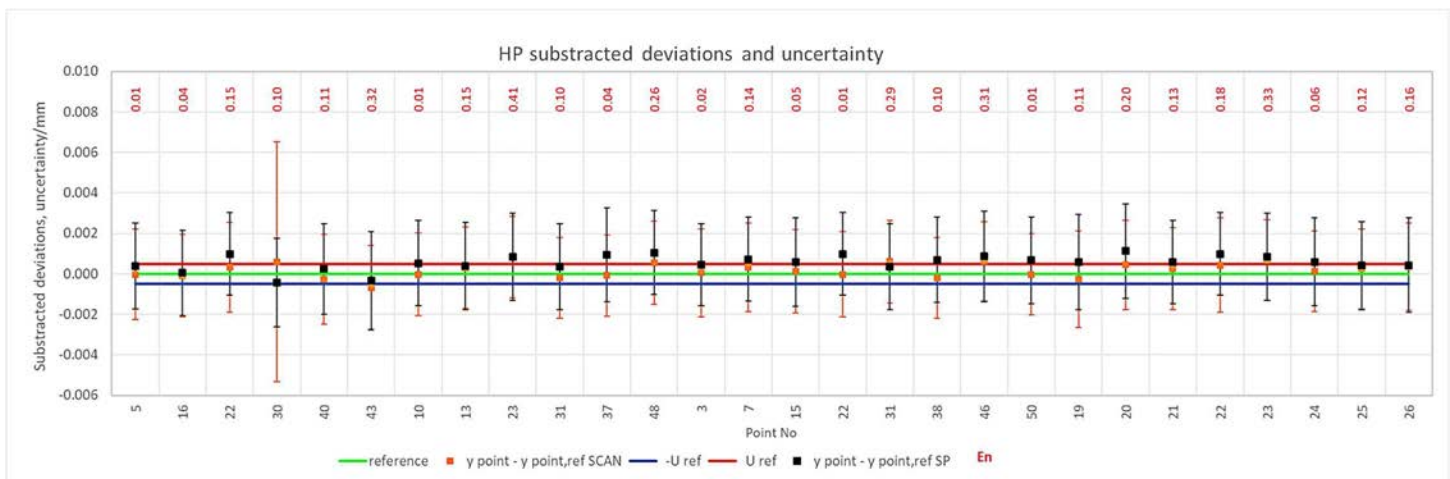
$$U = k \sqrt{E_L^2 + E_D^2 + E_{D,Loc}^2 + \frac{u_{rep}^2}{n_1} + \frac{u_{geo}^2}{n_2} + u_L^2 + u_D^2 + u_{D,Loc}^2 + u_{temp}^2}$$

Nel caso dei risultati ottenuti dall'UNIPD, la banda di incertezza calcolata risulta naturalmente maggiore rispetto a quella del CMI, principalmente dovuta alle prestazioni della CMM a

disposizione. Tuttavia, l'incertezza estesa  $U$  calcolata risulta essere costante e dell'ordine dei  $2 \mu\text{m}$ . Si tratta di un risultato soddisfacente che rappresenta una solida base per la validazione del metodo delle *multiple measurement strategies*.

### 5.3.1 Analisi dei risultati sperimentali in scansione lungo delle traiettorie

Sono state definite 4 rette sulla superficie del componente che passano per alcuni dei 52 punti definiti dal measurement plan, misurate con una strategia di misura in scansione. Ricordando la Fig 4.20 del capitolo precedente nella quale sono rappresentate la disposizione dei 52 punti sulla superficie del pezzo e le rette prese a riferimento, lo scopo della strategia in scansione lungo queste rette è quello di acquisire un gran numero di punti da poter elaborare ed estrapolare da tutti questi punti quelli che corrispondono a quelli tastati nella strategia a punti singoli. Per questo è stato necessario definire con accuratezza lo *step width* da impostare nel programma CNC, in modo da calcolare, durante la scansione, i punti che si trovano nell'intorno più vicino ai punti definiti dalla strategia a punti singoli. In questo modo si può procedere con una buona approssimazione a confrontare la deviazione della normale alla superficie calcolata con queste due strategie: a punti singoli e a scansione.



**Grafico 5.14:** confronto dei risultati e incertezza per i punti misurati in scansione e a punti singoli

I risultati ottenuti sono riportati nel Grafico 5.14, che mostra il confronto dei risultati ottenuti secondo le due strategie. La strategia in scansione mostra dei risultati che sono anche migliori di quelli a punti singoli tastati, in termini di deviazione della normale alla superficie rispetto a quella

di riferimento data dal CAD, in quanto per nessun punto si ha un valore fuori dell'intervallo d'incertezza del valore tarato, tranne che per il punto numero 30. Il risultato di questo punto è certamente influenzato da un fattore esterno durante la scansione, probabilmente della polvere depositata sulla superficie, in quanto dai dati ottenuti nelle varie ripetizioni e orientazioni del pezzo si nota una variabilità elevata dei risultati tra le posizioni della *Home position* e *Z position* (la cui base del pezzo è appoggiata sul tavolo della CMM) e la *X position* e *Y position* (in cui il pezzo è inclinato su un fianco), vedere Fig 4.22. Questo punto potrebbe essere trattato come outlier, ma da notare che grazie a questo metodo di valutazione che si vuole validare è stato possibile trovare un risultato anomalo andando a variare l'orientazione del pezzo, cosa che non sarebbe stato possibile valutare se si misurava in una sola posizione. Anche per la valutazione dell'incertezza estesa U, rappresentata nel grafico come delle bande, si hanno dei valori pressochè uguali per le due strategie di misura.

## Capitolo 6

### Considerazioni finali

Dai risultati sperimentali ottenuti si potrebbe affermare che i metodi proposti dal progetto EUCoM per la valutazione dell'incertezza di misura utilizzando le *multiple measurement strategies* possono risultare realistici ed accettabili. Grazie a questo metodo è possibile riscontrare delle incongruenze nelle misurazioni, in quanto la strategia prevede di ruotare il pezzo in quattro orientazioni, cosa che altrimenti non sarebbe possibile in una sola posizione di misura. Questo aspetto è stato osservato durante il lavoro di tesi e discusso in questo capitolo, come per il caso del *Multi Feature Check*, Capitolo 5.2.

Alcuni limiti che si possono avere durante l'utilizzo della normativa ISO 15530 parte 2 sono dovuti alla difficoltà di orientare il pezzo in quattro posizioni diverse, oppure sono richiesti dei sistemi di fissaggio particolari per il componente in esame quando lo si deve misurare in alcune delle quattro orientazioni. Anche per il sistema di fissaggio del pezzo si deve dedicare particolare attenzione perché potrebbe influenzare l'attività di misura, ciò comporta la necessità di sostituirlo con un altro più adatto.

Un altro fattore di cui bisogna tener conto è il tempo necessario a svolgere tutte le misure sul pezzo. Preparare quattro piani di misura differenti, bloccare il pezzo in quattro posizioni differenti ed eseguire tutte le misure necessarie richiede del tempo e rappresenta dunque un costo da non sottovalutare e da confrontare con il costo che deriverebbe dall'utilizzo di pezzi tarati. Per ridurre questi tempi sarebbe opportuno preparare il piano di misura, sistema dei tastatori e il sistema di fissaggio al pezzo che si ritiene più adatto, prima di iniziare l'attività di misura, così da ridurre al minimo gli sprechi di tempo.

## **6.1 Considerazioni sull'effetto della temperatura**

Come più volte specificato durante l'analisi dei risultati ottenuti e dai confronti con quelli degli altri partner, il contributo relativo alla temperatura è stato, in un primo confronto, trascurato per permettere di comparare i risultati in maniera più equa. Tuttavia, anche se successivamente è stato introdotto il contributo d'incertezza relativo alla temperatura si è potuto notare che quest'ultimo contribuisce in modo meno importante nel calcolo finale dell'incertezza estesa. Quindi si potrebbe considerare accettabile il fatto di misurare la temperatura una sola volta durante la misurazione, se questa non richiede un arco di tempo troppo lungo. Più importante sarebbe effettuare le misurazioni senza impiegare diversi giorni, in questo caso altrimenti l'effetto della temperatura potrebbe incidere maggiormente nei risultati finali, a causa di una possibile variazione più estesa delle condizioni ambientali. Nel nostro caso quest'ultima condizione non si è verificata, ma le misurazioni sono state svolte in un arco di tempo ragionevolmente corto.

## **6.2 Considerazioni sull'effetto della velocità di scansione**

Durante il lavoro svolto sono stati eseguiti i piani di misura indicati dal progetto EUCoM, tuttavia per ampliare la raccolta di informazioni sono stati fatti ulteriori studi non previsti, ma che riteniamo importanti e che si dovrebbero considerare nel calcolo dell'incertezza estesa  $U$ . È importante ricordare che nella pratica industriale per ridurre i tempi legati alle misurazioni, si effettuano quasi sempre misure in scansione continua e quindi il metodo proposto da EUCoM, nato per facilitare la valutazione dell'incertezza in ambito industriale, dovrebbe tener conto degli effetti della velocità di scansione sul risultato di misura. Sono state svolte delle misurazioni nel caso della *biella*, Capitolo 5.1, a differenti velocità di scansione per studiarne l'effetto sui risultati. L'influenza della velocità di scansione è tale da ritenere importante il suo effetto più essa aumenta e valutare il contributo di incertezza che ne deriva. L'accelerazione e quindi i carichi inerziali nella scansione sono sempre presenti e all'aumentare della velocità, anche le accelerazioni aumentano, ma con il quadrato della velocità di scansione su una traiettoria circolare di raggio noto. Quindi noti questi parametri si potrebbe quantificare un contributo di incertezza derivante dalla velocità di scansione utilizzata. Questa sperimentazione sull'influenza delle velocità di scansione è servita ad evidenziare un possibile limite della procedura proposta da EUCoM per la valutazione dell'incertezza di misura. Infatti, la procedura non considera tra i vari contributi di incertezza tipo il contributo di incertezza dovuto alla velocità di scansione che, come dimostrato attraverso i grafici, risulta avere una certa influenza sul risultato di misura. Attraverso test a differenti velocità di scansione si potrebbe definire un metodo per considerare questo contributo in termini di incertezza. Se si tiene come riferimento una velocità di scansione che consente di ottenere dei risultati di misura il più vicino a quelli dei pezzi tarati, si potrebbe determinare dei coefficienti costanti da applicare ogni volta che le misurazioni sono svolte a velocità superiori a quella definita

come target. Queste costanti si potrebbero determinare con prove sperimentali utilizzando la deviazione tra i risultati ottenuti a velocità target e velocità che si vuole utilizzare.

Tuttavia, se la normativa venisse validata risulterebbe essere un'ottima alternativa ai metodi esistenti e potrebbe essere applicata in tutti quei casi in cui è difficile se non impossibile utilizzare altri metodi.

## Bibliografia

- [1] ISO 15530-4:2010. *Geometrical Product Specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation, 2010.*
- [2] ISO 15530-3:2011. *Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards, 2011.*
- [3] ISO/TS 15530-2. *Geometrical Product Specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 2: Use of multiple measurement strategies in measurements of artefacts Introduction, 2005.*
- [4] ISO/TS 15530-1:2013. *Geometrical product specifications (GPS) — Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 1: Overview and metrological characteristics, 2010*
- [5] O. Sato. *Uncertainty evaluation procedure for dimensional measurement using coordinate measuring machine, 2019.*
- [6] ISO 213 Annex A (informative): *Examples of the formulas with which the result, the uncertainty contributions and systematic errors may be calculated - 2011*
- [7] ISO 213 Annex B (informative): *Examples of the formulas with which the result, the uncertainty contributions and systematic errors may be calculated - 2011*
- [8] A. Balsamo. *EUCoM Standards for the evaluation of the uncertainty of coordinate measurements in industry, 2018.*
- [9] A. Balsamo. *EUCoM - Data needed for the a posteriori method A\_terminology - 2019*

- [10] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). *International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms*. BIPM, 3rd edition, 2008.
- [11] ISO 10360-1:2005. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 1: Vocabulary*, 2005.
- [12] ISO 10360-2:2010. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions*, 2010.
- [13] ISO 10360-3:2005. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 3: CMMs with the axis of a rotary table as the fourth axis*, 2005.
- [14] ISO 10360-4:2005. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 4: CMMs used in scanning measuring mode*, 2005.
- [15] ISO 10360-5:2010. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 5: CMMs using single and multiple stylus contacting probing systems*, 2010.
- [16] ISO 10360-6:2005. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 6: Estimation of errors in computing Gaussian associated features*, 2005.
- [17] J. L. Andreasen E. Savio S. Carmignato L. De Chi\_re, H. N. Hansen. *Geometrical Metrology and Machine Testing*. DTU, 2015.
- [18] UNIPD TEST REPORT Connecting Rod – 2020
- [19] UNIPD TEST REPORT Multi Feature Check - 2020
- [20] UNIPD TEST REPORT Hyperbolic Paraboloid - 2020
- [21] Multi Feature Check Eumetron Calibration certificate - 2018
- [22] Giovanni Peterle, *Verifica di un metodo analitico per il calcolo dell'incertezza di misure a coordinate*, 2019
- [23] BIPM, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor correctio
- [24] ISO/TC 213/WG 10 N 727-2 ISO DTS 15530-2 Annex A