



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento: DAUR, Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE
INDIRIZZO: PROGETTAZIONE MECCANICA E INGEGNERIA MOTOCICLISTICA
CICLO XXII

**TARATURA DI BRACCI ARTICOLATI DI MISURA
CHE INTEGRINO UN SISTEMA DI SCANSIONE NON A CONTATTO**

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Paolo Bariani

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Vittore Cossalter

Supervisore: Ch.mo Prof. Roberto Meneghello
Ch.mo Prof. Gianmaria Concheri

Dottoranda: Angelisa Pizzol

"Non commettere ingiustizie di misura,
né di lunghezze, né di pesi, né di capacità"
Levitico 19 , 35

Indice

INDICE	I
INDICE FIGURE	III
INDICE TABELLE.....	VI
SOMMARIO.....	1
ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	3
1 CAPITOLO 1 - MACCHINE DI MISURA A COORDINATE (CMM).....	5
1.1 INTRODUZIONE.....	5
1.2 CENNI STORICI	5
1.3 GENERALITÀ E FUNZIONAMENTO DELLE MACCHINE DI MISURA A COORDINATE (CMM)	6
1.4 LA NON IDEALITÀ DELLA CMM	11
1.4.1 <i>Il modello delle 18 funzioni d'errore</i>	12
1.4.2 <i>Altri Modelli di compensazione degli errori di geometria</i>	15
1.5 DIAGNOSTICA E VERIFICHE SALTUARIE	16
1.5.1 <i>Verifiche intermedie</i>	16
1.6 LA DIFFUSIONE DELLA CONOSCENZA E DELL'UTILIZZO DELLE NORME	20
1.6.1 <i>Introduzione</i>	20
1.6.2 <i>Cenni storici</i>	21
1.6.3 <i>Le norme</i>	22
1.6.3.1 La norma CMMA.....	22
1.6.3.2 La norma giapponese JIS (1987).....	23
1.6.3.3 La norma inglese BSI 6808 - parte 2 (1987)	23
1.6.3.4 La norma ASME B89.....	23
1.6.3.5 La norma tedesca VDI/VDE 2617 (1983-2006).....	27
1.6.3.5.1 La norma VDI/VDE 2617-2.1 (1986).....	30
1.6.3.5.2 La norma VDI/VDE 2617-3 (1989).....	30
1.6.3.5.3 La norma VDI/VDE 2617-4 (1989).....	31
1.6.3.6 La norma ISO 10360	32
1.6.3.6.1 La norma ISO 10360-1 : 2000 – Terminologia.....	32
1.6.3.6.2 La norma ISO 10360-2 : 2001 – Verifica di prestazioni	33
1.6.3.6.3 La norma ISO 10360-3:2000 – CMM con tavola rotante.....	37
1.6.3.6.4 La norma ISO 10360-4 : 2000 – Verifica di CMM utilizzate in scansione.....	40
1.6.3.6.5 La norma ISO 10360-5:2000 - modalità punto - punto per tastatori multipli.....	42
1.6.3.7 Confronto tra ISO 10360 e B89	47
1.7 I BRACCI ARTICOLATI DI MISURA.....	49
1.7.1 <i>Introduzione</i>	49
1.7.2 <i>Generalità e principio di funzionamento</i>	50
1.7.3 <i>Vantaggi e svantaggi di utilizzo</i>	51
1.7.4 <i>Ambiente di lavoro</i>	52
1.7.5 <i>Norme sui bracci di misura articolati</i>	53
1.7.5.1 La norma ASME B89.4.22-2004.....	54
1.7.5.2 La norma VDI/VDE 2617-9.....	59
1.8 CONCLUSIONI.....	60
2 CAPITOLO 2 - SISTEMI OTTICI.....	61
2.1 INTRODUZIONE.....	61
2.2 SISTEMI DI ACQUISIZIONE DEI DATI	61
2.3 I SENSORI TRIDIMENSIONALI	64
2.3.1 <i>I sensori attivi 3D</i>	65
2.3.2 <i>La triangolazione ottica</i>	66
2.3.3 <i>Meccanismi di scansione</i>	72
2.3.4 <i>Applicazioni dei sistemi ottici</i>	75
2.4 CARATTERIZZAZIONE DI UN SENSORE OTTICO 3D	77
2.4.1 <i>Parametri caratteristici di un sistema ottico</i>	77
2.4.2 <i>Fonti di errore nella scansione laser</i>	82

2.4.3	<i>Incertezza in un sistema a triangolazione</i>	85
2.5	NORMATIVA DI RIFERIMENTO PER SISTEMI OTTICI.....	87
2.5.1	<i>La norma VDI/VDE 2617 part 6</i>	88
2.5.2	<i>La norma VDI/VDE 2634 Part 2</i>	89
2.6	CONCLUSIONI.....	97
3	CAPITOLO 3 - PROGETTO CAMPAGNA SPERIMENTALE	99
3.1	INTRODUZIONE.....	99
3.2	BRACCIO INTEGRATO CON LASER.....	100
3.3	PIANIFICAZIONE DELLA VERIFICA SPERIMENTALE.....	100
3.3.1	<i>Valutazioni prestazioni del braccio con la sonda a contatto</i>	102
3.3.1.1	Qualifica del tastatore.....	104
3.3.1.2	Errore di dimensione.....	104
3.3.1.3	Errore di forma.....	108
3.3.1.4	Influenza della temperatura.....	108
3.3.2	<i>Valutazioni prestazioni della sonda laser</i>	109
3.3.2.1	Qualifica della sonda.....	111
3.4	PARAMETRI DI TARATURA DEL COSTRUTTORE DELLO STRUMENTO.....	111
3.4.1	<i>Sistema integrato</i>	116
3.5	CONCLUSIONI.....	117
4	CAPITOLO 4 - VALIDAZIONE DELLA PROCEDURA	119
4.1	INTRODUZIONE.....	119
4.2	QUALIFICA DELLE SONDE.....	119
4.3	MISURE DI DIMENSIONE.....	121
4.3.1	<i>Sonda a contatto</i>	122
4.3.2	<i>Sonda non a contatto</i>	139
4.4	MISURE DI FORMA.....	141
4.4.1	<i>Sonda a contatto</i>	141
4.4.2	<i>Sonda non a contatto</i>	152
4.4.2.1	Ball bar rilevate con il laser.....	152
4.4.2.2	Errore di planarità.....	153
4.4.2.3	Artefatti per il laser.....	154
4.4.2.3.1	Artefatto 1.....	155
4.4.2.3.2	Artefatto 2.....	161
4.5	CONFRONTO TRA SONDA A CONTATTO E SONDA NON A CONTATTO.....	165
4.6	CONCLUSIONI.....	170
	CONCLUSIONI	171
	BIBLIOGRAFIA	173
5	APPENDICI	185
	APPENDICE 1 - CAMPIONI UTILIZZATI	185
	APPENDICE 2 - INCERTEZZA DI MISURA DI UNA MACCHINA DI MISURA A COORDINATE	192
	APPENDICE 3 - SCHEDA TECNICA DELLO STRUMENTO UTILIZZATO	198
	APPENDICE 4 - GRAFICI RELATIVI ALLE PROVE SPERIMENTALI RELATIVI ALL'ARTEFATTO 2	199

Indice figure

Figura 1-1 - Nomenclatura della CMM	7
Figura 1-2 - Esempi di macchine di misura	10
Figura 1-3 - Rappresentazione di una CMM composta da tre corpi rigidi aventi sei gradi di libertà ciascuno quindi sei movimenti parassiti ciascuno.	12
Figura 1-4 - Volume di misura della CMM non compensato e compensato.....	13
Figura 1-5 - Piatti per autotaratura	15
Figura 1-6 - Test del tastatore secondo la norma ANSI/ASME B89.....	27
Figura 1-7 - Distribuzione dei punti di tastatura per determinare l'errore di tastatura P e l'errore in scansione.	34
Figura 1-8 - Esempi di rappresentazione del massimo errore di indicazione	36
Figura 1-9 - Tavola rotante	38
Figura 1-10 - Schema delle traiettorie da scansire.....	41
Figura 1-11 - Braccio di misura articolato con particolari delle sonde.....	49
Figura 1-12 - Gradi di libertà di un braccio articolato di misura	50
Figura 1-13 - Sedi per la prova S.P.A.T.....	55
Figura 1-14 - Posizioni della sede nel volume di lavoro del braccio per la prova S.P.A.T secondo la Norma B89.....	55
Figura 1-15 - Schema delle posizioni di "default" del campione per la verifica di dimensione	57
Figura 1-16 - Esempio di grafico per indicare la prestazione volumetrica del braccio di misura	58
Figura 1-17 - Tastatura della sfera con 5 orientazioni del tastatore, come prescritto dalla norma VDI/VDE 2617-9	59
Figura 2-1 - Schema delle tecniche di acquisizione.....	62
Figura 2-2 - Rappresentazione delle alterazioni della luce	63
Figura 2-3 - Esempio di riflessione e rifrazione	63
Figura 2-4 - Suddivisione delle tecniche ottiche di acquisizione digitale 3D in funzione della modalità di interazione con l'oggetto reale e delle proprietà della luce utilizzata	64
Figura 2-5 - Triangolazione ottica di tipo attivo a spot puntiforme.	67
Figura 2-6 - Scansione 3-D tramite strisce laser: Digitalizzatore ottico	68
Figura 2-7 - Principio di triangolazione per un sensore 3D	69
Figura 2-8 - Pattern luminosi della sequenza di GRay	70
Figura 2-9 - Esempi di pattern	71
Figura 2-10 - Schema di principio di uno scanner a TOF	71
Figura 2-11 - Sensore ottico e a contatto	73
Figura 2-12 - CMM con sensore ottico	74
Figura 2-13 - Braccio di misura articolato con sonda a contatto e con sonda laser	74
Figura 2-14 - Campo di applicazione dei sensori ottici.....	75
Figura 2-15 - Integrazione delle tecnologie dei sensori ottici	76
Figura 2-16 - Fasi che influenzano il processo di acquisizione	77
Figura 2-17 - Fattori di incertezza nel processo di acquisizione.....	78
Figura 2-18 - Fonti di errore di un sensore ottico	78
Figura 2-19 - Risoluzione lungo l'asse y di un sistema a lama di luce laser.....	80
Figura 2-20 - Risoluzione lungo l'asse x di un sistema a lama di luce laser.....	80
Figura 2-21 - Risoluzione lungo l'asse x di un sistema a lama di luce laser.....	80

Figura 2-22 - Parametri di influenza nella acquisizione di coordinate.	82
Figura 2-23 - Esempi di test per l'incertezza di rilevamento per differenti tipi di ottiche.	88
Figura 2-24 - Esempio di schema e strategia di acquisizione di un provino di vetro graduato.	89
Figura 2-25 - Provini previsti dalla Norma VDI/VDE 2634 Part 2	91
Figura 2-26 - Posizioni in cui deve essere acquisito il manubrio	93
Figura 2-27 - Posizioni in cui deve essere acquisito il piano	94
Figura 3-1 - Ball bar	105
Figura 3-2 - Possibili orientazioni del tastatore	107
Figura 3-3 - Scansione 3-D tramite strisce laser: Digitalizzatore ottico	110
Figura 4-1 - Disposizione dei punti di tastatura sul piano di riferimento nel metodo di allineamento 1P	125
Figura 4-2 - Valutazione delle lunghezze per il calcolo della distanza.....	126
Figura 4-3 - Disposizione dei punti di tastatura sul piano di riferimento per la misura.....	126
Figura 4-4 - Sistema di fissaggio dei blocchetti piano paralleli	127
Figura 4-5 - Valori non compensati della temperatura	130
Figura 4-6 - Valori compensati della temperatura.....	130
Figura 4-7 - Posizione dei campioni di lunghezza nelle 7 orientazioni	134
Figura 4-8 - Posizione dei campioni di lunghezza nel volume di misura	135
Figura 4-9 - Errore di indicazione in posizione tangenziale lontana.....	136
Figura 4-10 - Errore di indicazione in posizione tangenziale vicina.....	136
Figura 4-11 - Errore di indicazione in posizione radiale lontana	137
Figura 4-12 - Errore di indicazione in posizione radiale vicina	137
Figura 4-13 - Errore di indicazione in posizione verticale.....	138
Figura 4-14 - Errore di indicazione in posizione diagonale lontana.....	138
Figura 4-15 - Errore di indicazione in posizione diagonale vicina.....	139
Figura 4-16 - Errore di dimensione SD in posizione tangenziale	140
Figura 4-17 - Errore di dimensione SD in posizione radiale.....	140
Figura 4-18 - Orientazione (1) del tastatore nella presa punti della sfera	142
Figura 4-19 - Orientazione (2) del tastatore nella presa punti della sfera	142
Figura 4-20 - Fissaggio dell'anello	145
Figura 4-21 - Schema dei punti di tastatura dell'anello.....	146
Figura 4-22 - Posizione dei campioni nel volume di misura	147
Figura 4-23 - Posizione dell'anello nelle tre orientazioni.....	147
Figura 4-24 - Anello in posizione verticale	148
Figura 4-25 - Anello in posizione tangenziale	148
Figura 4-26 - Anello in posizione radiale.....	149
Figura 4-27 - Errore di tastatura in direzione tangenziale	151
Figura 4-28 - Errore di tastatura in direzione radiale	151
Figura 4-29 - Errore di tastatura in direzione verticale.....	152
Figura 4-30 - Procedura per ricreare le sfere.....	152
Figura 4-31 - Valore di planarità ottenuto con la sonda laser	154
Figura 4-32 - Modello dell'Artefatto 1	155
Figura 4-33 - Artefatto 1	156
Figura 4-34 - Nuvola di punti dell'Artefatto 1	157
Figura 4-35 - Fasi di costruzione dei piani di best fit a partire dalla nuvola di punti acquisiti con la sonda laser.....	159
Figura 4-36 - Istogramma relativo all'Artefatto 1 in posizione vicina.....	159

Figura 4-37 - Istogramma relativo all'Artefatto 1 in posizione vicina	160
Figura 4-38 - Riferimenti Artefatto 2	161
Figura 4-39 - Fasi di elaborazione della sfera	161
Figura 4-40 - Errore di dimensione delle sfere in Posizione 1	162
Figura 4-41 - Errore di posizione in Z delle sfere in Posizione 1	163
Figura 4-42 - Errore di posizione in Y delle sfere in Posizione 1	163
Figura 4-43 - Errore di posizione in Z delle sfere in Posizione 1	164
Figura 4-44 - Definizione del ciclo di acquisizioni	165
Figura 5-1 - Dimensioni e nomenclatura di blocchetti piano paralleli a sezione rettangolare secondo ISO 3650	185
Figura 5-2 - Blocchetti piano paralleli	186
Figura 5-3 - Anello di riscontro	187
Figura 5-4 - Artefatto 1	190
Figura 5-5 - Modello 3D del campione Artefatto 2	191
Figura 5-6 - Principali contributi di incertezza	197
Figura 5-7 - Errore di dimensione delle sfere in Posizione 2	199
Figura 5-8 - Errore di posizione in X delle sfere in Posizione 2	199
Figura 5-9 - Errore di posizione in Y delle sfere in Posizione 2	200
Figura 5-10 - Errore di posizione in Z delle sfere in Posizione 2	200
Figura 5-11 - Errore di dimensione delle sfere in Posizione 3	200
Figura 5-12 - Errore di posizione in X delle sfere in Posizione 3	201
Figura 5-13 - Errore di posizione in Y delle sfere in Posizione 3	201
Figura 5-14 - Errore di posizione in XZ delle sfere in Posizione 3	201

Indice tabelle

Tabella 1-1 - Principali normative dagli anni '80.....	20
Tabella 1-2 - Posizioni della tavola.....	39
Tabella 1-3 - Densità di scansione.....	40
Tabella 1-4 - Argomenti trattati dalle norme.....	45
Tabella 1-5 - Confronto tra la norma B89 e la ISO 10360.....	48
Tabella 1-6 - Tabella riassuntiva delle posizioni del campione di misura.....	56
Tabella 1-7 - Tabella di raccolta dei risultati delle misure di dimensione volumetrica.....	58
Tabella 2-1 - Parametri di influenza di un'acquisizione nel dettaglio.....	83
Tabella 3-1- Valori nominali delle ball bar.....	104
Tabella 3-2 - Pianificazione dell'attività sperimentale del braccio articolato.....	114
Tabella 3-3 - Pianificazione dell'attività sperimentale del laser.....	115
Tabella 3-4 - Ipotesi di confronto tra sistema a contatto e non a contatto.....	117
Tabella 4-1 - Ripetibilità calibrazione sonda a contatto.....	120
Tabella 4-2 - Riproducibilità calibrazione sonda a contatto.....	120
Tabella 4-3 - Valori medi dell'errore di indicazione su ball bar.....	123
Tabella 4-4 - Confronto tra i metodi di allineamento.....	124
Tabella 4-5 - Schema del metodo di allineamento utilizzato.....	125
Tabella 4-6 - Valori medi dell'errore per posizione, blocchetto e orientazione del tastatore.....	128
Tabella 4-7 - Compensazione della temperatura.....	129
Tabella 4-8 - Ripetibilità sfera in posizione radiale.....	142
Tabella 4-9 - Ripetibilità della sfera secondo norma B89 in posizione tangenziale.....	143
Tabella 4-10 - Ripetibilità della sfera tastata con 25 punti in posizione tangenziale e radiale.....	144
Tabella 4-11 - Schema di misura dell'anello.....	146
Tabella 4-12 - Errori di tastatura e di posizione.....	150
Tabella 4-13 - Valori relativi al paino acquisito.....	154
Tabella 4-14 - Parametri riassuntivi.....	160
Tabella 4-15 - Valori del raggio e delle coordinate del centro delle sfere.....	162
Tabella 4-16 - Valori delle distanze tra sfere.....	164
Tabella 4-17 - Proposta di confronto tra sonda a contatto e sonda laser.....	166
Tabella 4-18 - Prove sperimentali effettuate su braccio articolato di misura.....	168
Tabella 4-19 - Prove sperimentali effettuate su laser.....	169
Tabella 5-1 - Caratteristiche blocchetti piano paralleli.....	186
Tabella 5-2 - Caratteristiche anello di riscontro.....	187
Tabella 5-3 - Caratteristiche delle ball bar.....	189
Tabella 5-4 - Valori nominali dei blocchetti.....	190
Tabella 5-5 - Caratteristiche geometriche del campione di riferimento Artefatto 2.....	191
Tabella 5-6 - Distanze spaziali tra centri di sfere.....	191
Tabella 5-7 - Contributi di incertezza per CMM secondo ISO/DTS 23165.....	194
Tabella 5-8 - Confronto tra i contributi all'incertezza.....	195
Tabella 5-9 - Valori di incertezza.....	196

Sommario

Scopo: L'obiettivo della ricerca è stato la definizione e realizzazione di una norma o di una specifica tecnica per lo sviluppo di una procedura di taratura di un sistema di misura costituito da un braccio articolato di misura e da un laser.

Metodo: Sono state studiate le normative vigenti e le tecniche per la verifica della precisione e dell'accuratezza dei sistemi in oggetto. Le tecniche sono state poi sviluppate e applicate ad un caso reale per evidenziarne i limiti applicativi e le soluzioni. Le direttive proposte dalle normative vigenti sono state modificate e adattate per eliminare le cause di incompatibilità riscontrate nelle tipologie di strumenti oggetto del lavoro ed è stato realizzato e proposto un metodo per valutare le prestazioni di tali sistemi di misura.

Risultati: Il principale risultato ottenuto è la specifica tecnica che permette di valutare le prestazioni di un sistema costituito da un braccio articolato di misura che integra un sistema di scansione non a contatto. Durante l'attività di ricerca sono stati ottenuti altri risultati come ad esempio una panoramica di problematiche relative all'utilizzo di strumenti di misura ottici e le modalità per affrontarle o risolverle.

Applicazioni pratiche: Durante la ricerca sono stati applicati strumenti e metodi inerenti la taratura di macchine di misura a coordinate, con particolare interesse ai bracci articolati di misura, e di strumenti a scansione laser.

Originalità: la specifica tecnica proposta, risultato della ricerca, è un nuovo e unico modello nel panorama internazionale per la verifica delle prestazioni di bracci articolati di misura che integrano sistemi di scansione non a contatto.

Parole chiave: Braccio articolato di misura, laser, artefatti, ASME B89.4.22, VDI/VDE 2634-2

Abstract

Purpose: The aim of this research thesis is the definition and implementation of an original norm or a technical specific for developing a procedure for calibration of a measuring system consists of an articulated arm coordinate measuring machine and a laser.

Design/methodology/approach: Regulations and techniques for the verification of precision and accuracy of these system have been studied and analyzed. These techniques have been also developed and applied in case-studies to highlight the application limits and solutions.

The guidelines proposed by the current standards have been modified and adapted to eliminate the causes of incompatibility found in the type of instruments covered by the work. A method to evaluate the performance of these measurement systems is developed and proposed.

Findings: The main result is the technical specific for assessing the performance of a system consisting of an articulated arm coordinate measuring machine that incorporates a non-contact scanning system. During the research other results have been obtained such as an overview of issues relating to the use of optical measuring instruments and methods to address or resolve.

Practical applications: During the search tools and methods have been applied concerning the calibration of coordinate measuring machines, with particular interest in the articulated arm measuring and laser scanning instruments.

Originality/value: The propose technical specific, research results, is a new and unique model in the international arena for testing the performance of articulated arms coordinate measuring machines that integrate non-contact scanning systems.

Keywords: Articulated Arm Coordinate Measuring Machine, laser, artefact, ASME B89.4.22, VDI/VDE 2634-2

Introduzione

La caratterizzazione geometrica e dimensionale accurata di oggetti fisici costituisce uno degli aspetti di maggior interesse e di più rapida evoluzione nel contesto industriale attuale.

Per questo la possibilità di avere a disposizione strumenti in grado di riprodurre fedelmente la forma e di misurare le caratteristiche di oggetti reali è di fondamentale importanza soprattutto in quei settori a forte componente progettuale oltre che nei settori medicale, della bioingegneria e del design industriale.

Negli ultimi anni si sono sviluppati strumenti di misura impiegati dall'acquisizione di dati tridimensionali per il Reverse Engineering al controllo qualità, dalla prototipazione virtuale e rapida a tecniche per la gestione integrata del prodotto. Queste tecnologie si basano sulla rilevazione a contatto, macchine di misura a coordinate e in particolare bracci articolati di misura e senza contatto, sistemi ottici di digitalizzazione 3D.

Contemporaneamente si cerca di avere la tracciabilità metrologica di un processo di acquisizione ed elaborazione di dati e l'omogeneità tra valutazioni di prestazioni di strumenti analoghi.

Particolare interesse rivestono gli strumenti che nascono dall'integrazione di braccio articolato di misura e sistema a scansione non a contatto. Tali sistemi integrano in un unico strumento i vantaggi che si hanno con la misurazione a contatto e con quella non a contatto. Infatti nei prodotti meccanici, la cui complessità formale è preponderante e si rende necessario l'utilizzo di strumenti che permettono il rilievo delle caratteristiche geometriche, metriche e dimensionali, l'uso di strumenti integrati risolve molti problemi.

Tale consapevolezza, e la necessità del mercato di dotarsi di sistemi di rilievo a basso costo, spinge la ricerca verso la realizzazione di strumenti integrati che permettono un incremento delle prestazioni e una maggior affidabilità.

Quello che manca è la definizione di standard che regolano l'uso e le prestazioni di tali strumenti, e che sarà oggetto di tale lavoro. Per questo motivo la novità di tali strumenti non ha permesso di sfruttare al meglio le loro potenzialità, poiché non esiste ancora una norma internazionale riconosciuta per l'identificazione dei parametri funzionali degli strumenti ottici.

Quindi la mancanza di norme di riferimento per tali strumenti implica modalità di valutazione diverse e ciascun produttore utilizza procedure personalizzate e interne all'azienda.

L'attività svolta in questa tesi presenta lo sviluppo di una procedura di verifica delle prestazioni di un sistema costituito da un braccio di misura articolato che integra un sistema laser per l'acquisizione 3D senza contatto, basato sul principio della triangolazione, utilizzato principalmente nel processo di ispezione tipico della Reverse Engineering e nel controllo di qualità (dimensionale e di forma).

Lo studio presentato in questa tesi può essere suddiviso in tre sezioni distinte: nella prima, si è puntato ad acquisire le conoscenze di base relative alle macchine di misura a coordinate, con particolare attenzione ai bracci articolati di misura, e ai sistemi di misura ottici che sfruttano il principio della triangolazione.

Nella seconda è stata analizzata la vigente normativa tecnica che regola la validazione dei sistemi di misura a coordinate e di visione stereo per il rilievo di forme tridimensionali.

La normativa americana presenta una norma applicabile ai bracci di misura a coordinate, la B89.4.22:2008.

Esaminando la normativa tecnica tedesca è stata rintracciata una norma dedicata esclusivamente alla taratura di bracci di misura articolati, la norma VDI/VDE 2617 Part 9 e una relativa alla validazione dei sistemi di visione stereo per il rilievo di forme tridimensionali, la norma VDI/VDE 2634 Part 2, anche se quest'ultima non è applicabile direttamente alla tipologia di strumenti oggetto del presente lavoro..

Infine, a seguito dei rilievi sperimentali realizzati con bracci di misura articolati che integrano sistemi di scansione non a contatto, è stata avanzata una proposta di linea guida per la taratura di tali strumenti di misura.

Più in dettaglio l'obiettivo della ricerca è stato la realizzazione di una specifica tecnica ossia un documento tecnico che rappresenta uno stato dell'arte non ancora consolidato di prodotti, processi e servizi, per lo sviluppo di una procedura di taratura di un sistema di misura costituito da un braccio articolato di misura e da un laser.

Il documento vuole rappresentare un modello di riferimento che un generico utilizzatore possa adottare come linea guida per la verifica delle prestazioni di un sistema così definito.

Dato l'obiettivo finale della ricerca, essa si è sviluppata secondo due direzioni parallele: la prima rivolta allo studio e all'analisi dello stato dell'arte e della normativa vigente, relativamente alle tipologie di questi strumenti, ai fattori che influiscono sulle loro prestazioni e alle modalità di taratura; l'altra che propone una linea guida per la valutazione dei parametri di bracci di misura con integrato un sistema di scansione non a contatto (ad esempio un laser) e che valida una procedura di taratura mediante una campagna sperimentale.

Le applicazioni svolte hanno permesso di verificare gli aspetti critici dell'utilizzo di questi strumenti, di valutare le migliori modalità di misura e di indagare quale tecniche applicare e quale sia il miglior approccio.

Il lavoro di sintesi, infine ha permesso di redigere la specifica tecnica, oggetto della ricerca.

1 Capitolo 1 - Macchine di misura a coordinate (CMM)

1.1 Introduzione

Le Macchine di Misura a Coordinate (CMM) hanno rivoluzionato la metrologia dimensionale di tutti i componenti prodotti, non solo per la loro precisione, convenienza e semplicità d'uso, ma anche per l'ampia tipologia di misure che tramite esse possono essere intraprese. Le CMM vengono frequentemente utilizzate per effettuare misure su una vasta varietà di componenti di tutte le dimensioni, che possono essere critiche per le prestazioni del prodotto finito. Molto spesso la complessità di queste misure va ben oltre le capacità della metrologia dimensionale convenzionale.

L'adattabilità delle CMM a misurare accuratamente oggetti di dimensioni e configurazioni geometriche notevolmente diverse tra loro e la loro idoneità a fornire la relazione tra le varie caratteristiche di un pezzo lavorato, fanno di tali dispositivi di misura validi strumenti anche per il controllo di processo. A tale flessibilità si associa la capacità di condurre operazioni di misura a coordinate in maniera molto veloce, e ciò fa sì che i risultati di misura possano essere utilizzati per ampliare efficacemente le richieste del processo manifatturiero, tenendo conto dei costi, e per analizzare l'andamento del processo stesso.

Pertanto, mentre inizialmente la metrologia a coordinate costituiva solamente un mezzo per il controllo di qualità, ultimamente è divenuta un utile strumento per il controllo di processo: le informazioni dimensionali registrate durante la misurazione della singola parte possono essere infatti utilizzate come controllo sullo stato del processo utilizzato per la realizzazione della stessa.

1.2 Cenni storici

Introdotte alla fine degli anni '50, le macchine di misura a coordinate sono state inizialmente utilizzate, come altri sistemi di controllo più tradizionali, per una verifica manuale della geometria e delle dimensioni di parti meccaniche. Con l'evolversi del controllo numerico e dei sistemi di produzione flessibili, la diffusione delle macchine di misura ha conosciuto un notevole incremento come sistemi flessibili per l'assicurazione della qualità del prodotto e il monitoraggio del processo produttivo.

Una Macchina di Misura a Coordinate (Coordinate Measuring Machine - CMM) è un robot cartesiano che permette la movimentazione di una sonda (end effector) per l'ispezione dimensionale e geometrica di manufatti. E' quindi un sistema di misura avente dai tre ai sei assi di movimentazione generalmente a controllo numerico, ciascuno in grado di fornire una accurata misura di posizione.

L'ispezione dimensionale di un oggetto contenuto nel volume di lavoro della macchina si realizza attraverso la movimentazione di un sensore in grado di rilevare un insieme di punti appartenenti alle superfici dell'oggetto. Attraverso la rilevazione delle coordinate di posizione dei punti rilevati e la loro successiva elaborazione software, è possibile ricostruire una rappresentazione matematica delle superfici dell'oggetto per utilizzare nella valutazione delle tolleranze dimensionali e geometriche imposte sull'oggetto stesso.

Una CMM è fondamentalmente caratterizzata da una elevata flessibilità, essendo in grado di effettuare una elevata varietà di misurazioni dimensionali e geometriche senza necessariamente aggiungere o modificare gli utensili. Al variare della produzione, compatibilmente con i requisiti dimensionali e di accuratezza richiesti, la stessa CMM può essere utilizzata, nella versione a controllo numerico, semplicemente modificandone il programma software di controllo.

Da alcuni anni, inoltre, le CMM stanno assumendo notevole importanza in nuove applicazioni di integrazione con i sistemi CAD/CAM, note come applicazioni di *Reverse Engineering*. Una macchina di misura a coordinate può infatti essere utilizzata per rilevare per punti superfici prototipali incognite caratterizzate anche da una notevole complessità.

L'invio di tali punti misurati ad un sistema CAD permette la generazione del modello matematico di forme geometriche non conosciute e di ottenere, quindi, un modello geometrico adeguato e utilizzabile in altre applicazioni, ad esempio in sistemi CAM per la definizione del processo di ottenimento delle superfici stesse.

Il primo tastatore era costituito da un rudimentale elemento conico interamente rigido, che non scattava automaticamente a contatto con il pezzo, pertanto esistevano solo CMM manuali. Solo negli anni '70 venne annunciata la commercializzazione delle prime CMM automatizzate e queste macchine raggiunsero immediatamente un ottimo livello di efficienza e affidabilità, potendosi avvalere dei rivoluzionari progressi che proprio in quegli anni si erano compiuti nei congegni tastatori. Infatti il tastatore rigido (*hard probe*) risultò improponibile per le nuove CMM che essendo motorizzate portavano facilmente a rottura il tastatore non potendone controllare la forza di contatto. Quindi nacque il *touch trigger probe* o, verosimilmente, tastatore "a grilletto" che, agendo con inflessione controllata, garantisce un contatto decisamente meno soggetto a vibrazioni e deformazioni.

Nacque così la prima sonda con scatto a contatto, un sensore 3D capace di effettuare un rilievo con rapidità e precisione e con una forza di scatto relativamente bassa.

Successivamente ai touch trigger probe si affiancarono gli analog probe o tastatori a scansione continua, capaci di registrare un numero enorme di punti su una superficie, proprietà che li ha resi insostituibili in certe applicazioni come nel reverse engineering. Lo sviluppo, poi, più recente di altre soluzioni innovative come la testa motorizzata ed il sistema di cambio automatico del tastatore, che consentono di mantenere la massima flessibilità di controllo anche nei sistemi senza personale, ha trasformato le CMM da apparecchi relativamente semplici in centri di controllo di alta precisione e completamente automatizzati.

Infine, negli ultimi anni sono state sviluppate CMM che integrano un sistema ottico, per cui al tastatore a contatto viene affiancato un sistema non a contatto.

1.3 Generalità e funzionamento delle macchine di misura a coordinate (CMM)

Generalmente le macchine di misura a coordinate (CMM) sono dispositivi di misurazione lineare che misurano contemporaneamente su tre coordinate cartesiane. La versione più comune consiste in tre assi di guida ortogonali denominati X, Y e Z. L'asse Z è normalmente basato sugli altri due assi e supporta una testa di misura con un sensore che opera con un sistema tattile (a contatto) oppure ottico (senza contatto). In ogni asse si trova una riga ottica, che si basa sul principio dei reticoli di diffrazione, meglio noti come frange Moiré e

che fornisce una misurazione digitale ad alta risoluzione (circa $0,5 \mu\text{m}$) delle coordinate a cui si trova il tastatore.

In Figura 1-1 è illustrata la nomenclatura delle parti della Macchina di misura a coordinate.

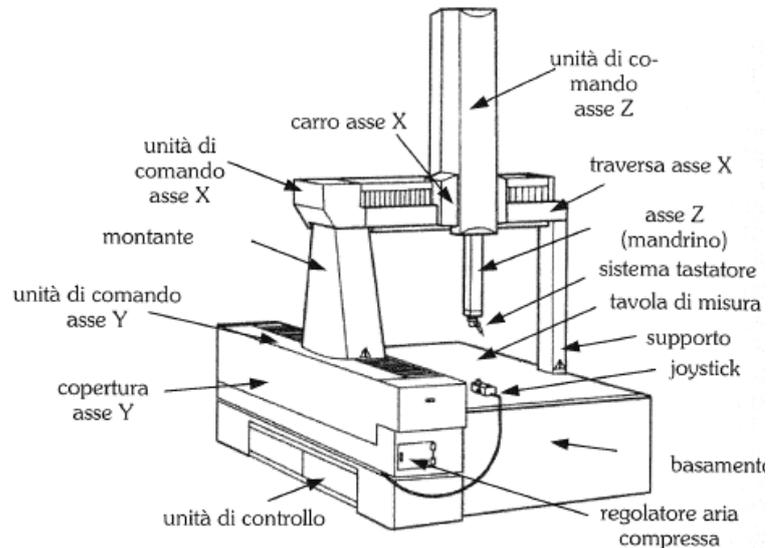


Figura 1-1 - Nomenclatura della CMM

Le macchine di misura vengono suddivise in:

- Macchine con assi o testa guidati a mano
- Macchine con assi motorizzati e guidate a mano con un joystick
- Macchine con assi motorizzati e comando numerico computerizzato (modalità CNC).

Caratteristica comune a tutte le macchine di misura a coordinate è che l'oggetto da misurare viene tastato punto per punto da uno stelo con punta sferica di rubino sintetico o di ceramica.

Ad ogni contatto di tastatura lo spostamento degli assi X, Y e Z viene rilevato sulle righe ottiche. Le coordinate riferite al punto centrale della sfera del tastatore vengono poi trasmesse al computer connesso per le successive analisi.

I vari costruttori di CMM hanno adottato nel tempo diverse configurazioni di struttura della macchina. Le più diffuse, riportate in

Figura 1-2, sono le seguenti:

- ✓ struttura a mensola e a tavola fissa, tipo Cantilever;
- ✓ struttura a portale mobile (bridge);
- ✓ struttura a portale fisso e tavola mobile;
- ✓ struttura a colonna;
- ✓ struttura a braccio orizzontale mobile;
- ✓ struttura a braccio orizzontale mobile e tavola mobile;
- ✓ struttura a ponte, tipo Gantry;
- ✓ struttura con portale a L.

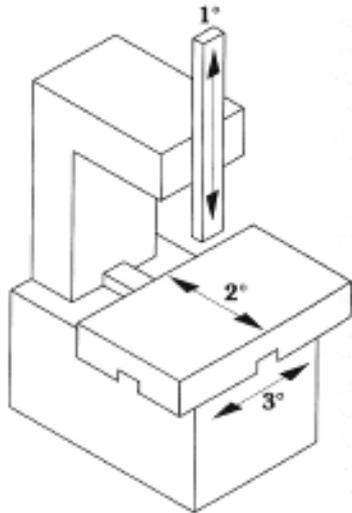
Queste macchine sono montate a pavimento, richiedono che l'utente porti l'oggetto da misurare alla CMM e sono di norma tenute in un ambiente controllato ed utilizzate solo da personale altamente qualificato.

Per completezza in

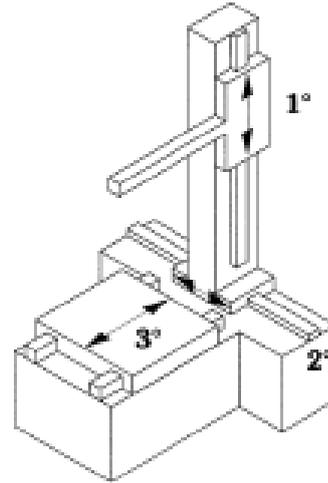
Figura 1-2 si riportano anche le macchine di misura portatili, che verranno trattate in seguito.

Queste macchine, note comunemente come bracci di misura, laser tracker o laser scanner, sono progettate per essere completamente portatili e pertanto possono essere utilizzate ovunque vi sia esigenza di una misurazione: è la macchina a raggiungere l'oggetto.





struttura a colonna



struttura a braccio orizzontale mobile e tavola mobile



struttura a ponte, tipo Gantry



struttura con portale a L



laser tracker



laser scanner



Figura 1-2 - Esempi di macchine di misura

I tastatori utilizzati devono essere prima qualificati, vale a dire che devono essere determinati i diametri e le distanze X, Y e Z del loro centro sfera. A questo scopo si utilizzano sfere di riferimento di alta precisione, che devono essere tastate in almeno cinque punti, oppure fori conici. I dati così ottenuti vengono tenuti in considerazione dal computer in tutte le misurazioni successive, facendo in modo che i diametri delle sfere tastatrici e le loro distanze vengano compensate nell'elaborazione e nel calcolo dei risultati, come se la misurazione fosse stata eseguita con un solo tastatore con sfera tastatrice di diametro pari a zero.

Poiché la tastatura viene generalmente eseguita con una forza di contatto tra 0,01 N e 0,2 N, se la macchina si muove in automatico (CNC), o anche di più nel caso di macchine movimentate manualmente, si produce una deflessione degli elementi di tastatura che non può essere trascurata nelle misure ad alta precisione. Essa viene perciò determinata durante la qualifica dei tastatori e compensata automaticamente nel corso delle misurazioni seguenti nel caso di macchine con testa a scansione.

Prima che il particolare, montato sulla tavola portapezzo e non allineato meccanicamente, possa essere misurato, occorre definire un sistema di coordinate al quale devono essere riferite tutte le dimensioni misurate successivamente. Questo sistema di coordinate di riferimento viene normalmente definito nel disegno tecnico quotato ed è formato ad esempio da caratteristiche che possono essere piani, cilindri, coni, punti di simmetria.

Esso consiste in un sistema di coordinate 3D con sei gradi di libertà, definiti da tre punti zero assiali, nonché da tre angoli, verso i quali il sistema di coordinate di riferimento è inclinato rispetto alle coordinate fisse della macchina.

Di regola viene determinato per primo un asse spaziale quale asse primario, ad esempio l'asse di un cilindro o la perpendicolare rispetto ad un piano. L'asse primario è definito da due angoli proiettati sui piani delle coordinate.

Poi viene fissato il terzo angolo, ad esempio tramite una retta che collega due fori o l'angolo della linea perpendicolare proiettato sul piano, detto anche asse secondario o fasatura.

La determinazione del sistema di coordinate di riferimento viene conclusa con la definizione dell'origine nei tre assi.

Un particolare meccanico può essere caratterizzato da più sistemi di riferimento indipendenti o in relazione tra loro, e il software compie l'elaborazione dei valori misurati.

Un requisito essenziale della tecnica di misura a coordinate è il calcolo e il riconoscimento di elementi geometrici provenienti dai punti presi, la cosiddetta nuvola di punti. Oltre a questa analisi, il computer deve assumersi anche il comando della macchina di misura coordinate sulla base dei programmi CNC memorizzati. Questa funzione direzionale (analisi e comando) mette severamente alla prova il suo rendimento in tempo reale.

1.4 La non idealità della CMM

La parte meccanica di una CMM è solitamente composta da tre carri che corrono su apposite guide, generando tre assi fra loro ortogonali che materializzano un sistema di riferimento cartesiano ortogonale, oppure da tre aste collegate alle estremità ma libere di ruotare, che generano un sistema di riferimento sferico. La funzione dei carri è di generare un moto perfettamente lineare dell'asse, che sia perpendicolare a quello di ciascuno degli altri due. Comunque, in entrambi i casi, le parti mobili della CMM hanno la funzione di generare rispettivamente un moto perfettamente lineare o perfettamente circolare. Questo avviene però solo a livello teorico.

La parte meccanica della CMM presenta imperfezioni geometriche che devono essere identificate, e qualora fosse possibile o conveniente, corrette al fine di eliminarne l'effetto sulle misure.

Storicamente le prestazioni delle macchine sono migliorate mediante la qualità sempre più spinta di manifattura ed assemblaggio delle strutture.

A partire dagli anni 80, sfruttando la crescente potenzialità dei calcolatori, si è iniziato a correggere gli errori di geometria con il software. La metodologia generalmente applicata viene definita "metodo della sintesi degli errori" e si basa:

- sul riconoscimento di tutti gli errori individuali di ciascun asse, i cosiddetti errori parametrici (gli errori misurati vengono infatti parametrizzati in funzione della posizione di ciascun asse), e della loro reazione alle variazioni delle condizioni ambientali;
- sul calcolo degli errori spaziali in ciascun punto del misurando, applicando due distinte tecniche:
 - la simulazione numerica – gli errori parametrici attivi per una definita posizione degli assi della CMM sono calcolati per interpolazione dai dati disponibili e vengono sommati secondo il principio della sovrapposizione dei loro effetti lineari ed angolari, essendo questi ultimi dipendenti dagli sbracci meccanici;
 - l'analisi statistica – gli errori parametrici sono trattati come variabili casuali, l'incertezza della misura delle coordinate è stimata dalla descrizione statistica di tutti i dati utilizzati per calcolare gli errori parametrici;
- sulla valutazione degli effetti degli errori spaziali, tenendo conto delle modalità di calcolo degli elementi geometrici sostitutivi da parte del software della CMM e delle loro interazioni.

L'ipotesi di una pura e semplice propagazione degli errori è valida solo se gli errori sulla caratteristica stimata sono completamente spiegati dagli errori delle coordinate dei punti tastati.

Quando questo non avviene occorre ipotizzare l'introduzione di errori da parte del software per la stima degli elementi geometrici.

1.4.1 Il modello delle 18 funzioni d'errore

Per operare la correzione software degli errori spaziali si deve ipotizzare ed applicare un modello matematico corrispondente alla configurazione cinematica della CMM, modello che tiene conto delle interazioni tra i vari errori in funzione degli sbracci meccanici e dei corrispondenti effetti di Abbe.

Un'assunzione che semplifica di molto il problema è che ciascuna parte del sistema si comporti come un corpo rigido, cioè che gli errori lungo un asse non siano dipendenti dalla posizione degli altri due.

Sotto questa assunzione la completa descrizione del moto di un carro o di un'asta di un braccio è possibile specificando i suoi sei gradi di libertà, che includono tre moti di traslazione e tre di rotazione. Ciascuno di questi parametri è funzione unicamente della posizione del carro o dell'asta.

Il modello, data la sua natura, viene denominato "delle diciotto funzioni cinematiche d'errore". Ad ogni carro o asta competono sei funzioni d'errore, come rappresentato in Figura 1-3.

Eventualmente alle 18 funzioni d'errore occorre aggiungerne altre 3, che corrispondono agli errori di quadratura tra ciascuna coppia di assi.

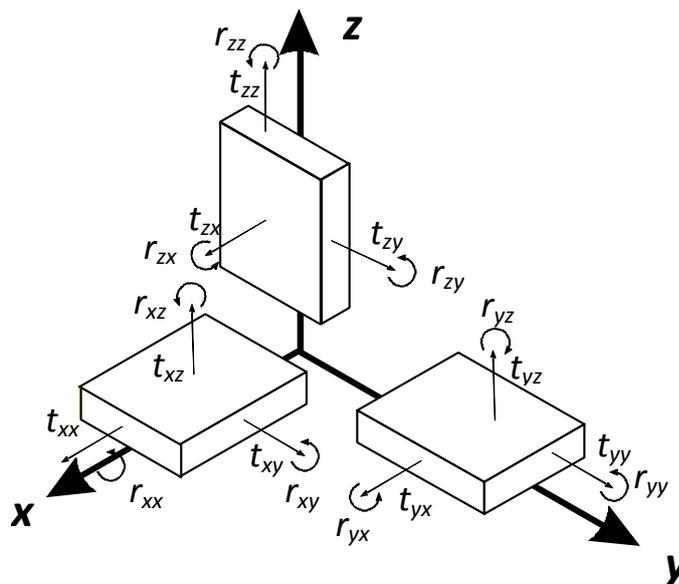


Figura 1-3 - Rappresentazione di una CMM composta da tre corpi rigidi aventi sei gradi di libertà ciascuno quindi sei movimenti parassiti ciascuno.

La modellizzazione degli errori si ottiene sfruttando una semplice osservazione: la distanza fra due punti di uno stesso oggetto deve restare costante al variare della posizione dell'oggetto all'interno dello stesso volume di lavoro: eventuali differenze registrate sono attribuibili ad errori sistematici della CMM ed al rumore.

La compensazione degli errori di natura geometrica equivale a raddrizzare lo spazio euclideo della CMM che nella realtà è distorto dalle imperfezioni strutturali.

La Figura 1-4 mostra il volume di misura di una CMM non compensata e quello della stessa compensata.

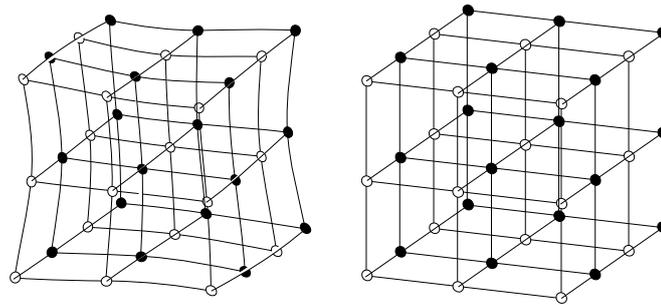


Figura 1-4 - Volume di misura della CMM non compensato e compensato

L'errore è definito come lo scostamento tra punti corrispondenti delle griglie. Tali griglie, sopra rappresentate in forma cubica, possono essere anche sferiche o di altre forme e dipendono dalla struttura della CMM.

Gli errori di geometria sono rappresentati per convenzione con tre lettere:

- la prima di esse indica gli errori lineari (t) o gli errori rotazionali (r);
- la seconda indica la direzione del movimento del carro in esame (scelta tra x, y oppure z);
- la terza indica la direzione degli errori lineari o l'asse di rotazione di quelli angolari.

Nel caso in cui si vogliono separare gli effetti delle quadrature, per esempio nei metodi di determinazione diretta, si aggiungono altri tre errori portando a 21 gli errori di geometria ed indicando quelli aggiuntivi con la lettera q seguita dalla coppia non ortogonale a causa dell'errore.

Metodologie per l'identificazione degli errori di geometria

Esistono due possibili metodologie di identificazione dei parametri delle funzioni d'errore: il metodo di rilevamento diretto con strumenti dedicati e il metodo indiretto mediante artefatto ad elementi geometrici.

In quest'ultimo caso gli errori sono stimati dalle differenze tra i valori misurati e i valori di taratura degli elementi geometrici dei campioni di riferimento, quali anelli, piatti a sfere, calibri a passi, posti in una molteplicità di locazioni nel totale del volume di misura della CMM. Si possono anche utilizzare campioni non tarati, nel qual caso si giunge allo stesso risultato, a meno di un fattore di scala da determinarsi utilizzando almeno un campione di lunghezza tarato.

Le misure indirette sono per il momento di difficile realizzazione sulle macchine di medie-grandi dimensioni.

Le misure dirette degli errori parametrici forniscono un'informazione completa, ma costosa in termini di tempo, di impegno di attrezzature, di esperienza ed abilità degli operatori.

Metodo diretto per l'identificazione degli errori di geometria

Questo metodo è quello che si è più utilizzato in passato, anche con l'unico scopo di misurare gli errori di geometria per il collaudo e la messa a punto meccanica, prima ancora di essere utilizzato per applicare le correzioni software.

Al giorno d'oggi i software gestiscono le correzioni tramite la gestione diretta delle funzioni di errore, mentre fino a non molti anni fa si utilizzavano per semplicità matrici di dati discreti.

La trattazione degli errori di geometria è un argomento molto vasto e complesso e in questa sede non sarà approfondito ulteriormente.

Metodi indiretti di misurazione degli errori di geometria

Le diciotto funzioni d'errore devono essere espresse tramite una rappresentazione analitica o tabulare. Una possibile rappresentazione analitica è quella polinomiale mediante polinomi di: Taylor, Legendre, Chebyshev, etc...

Ciascuna delle diciotto funzioni errore si esprime come combinazione lineare dei polinomi nella quale le incognite sono i coefficienti. Tali coefficienti vengono identificati sperimentalmente mediante un'apposita procedura, la quale prevede cicli di misura su di un piatto a sfere in un numero fissato di posizioni nel volume di misura.

La procedura sperimentale: metodo di autotaratura

Le procedure sperimentali che consentono di memorizzare le coordinate necessarie alla successiva elaborazione possono essere differenti. Le tecniche che adoperano piatti ad elementi geometrici, mantenendo fissa la distanza fra coppie qualsiasi di punti in qualunque posizione nel volume di misura, sono idonee a scrivere le equazioni necessarie.

Se il piatto è tarato, ossia le distanze fra tutte le coppie di sfere sono note, si può scrivere un sistema la cui equazione generica ha come termini noti le differenze tra distanze misurate e distanze note e come incognite i coefficienti degli sviluppi in serie delle funzioni d'errore, mediante cui si esplicita l'equazione.

Se il piatto non è tarato, si possono scrivere delle equazioni in cui i termini noti sono le differenze fra le distanze misurate della stessa coppia di sfere in due differenti posizioni. In quest'ultimo caso la tecnica di identificazione è nota come autotaratura.

Quando si utilizza un piatto ad elementi geometrici tarato, il trasferimento dell'unità è automaticamente verificato; viceversa, quando il piatto non è tarato il trasferimento avviene in una seconda fase.

La procedura di autotaratura infatti identifica la CMM a meno di un fattore di scala che viene determinato confrontando una o più distanze fra una o più coppie di sfere con la lunghezza, nota, di un campione tarato. Il vantaggio di utilizzare la tecnica di autotaratura risiede proprio nel dover disporre non di un piatto tarato ma di un campione più piccolo, per esempio un campione bisfera tarato.

In ogni caso, la procedura sperimentale per l'identificazione degli errori di geometria consiste nell'acquisire le coordinate di un certo numero di centri sfera in un certo numero di posizioni nel volume di misura della CMM.

Il numero di sfere da tastare, così come il numero di posizioni del piatto e le sue disposizioni dipendono dall'estensione del volume da identificare.

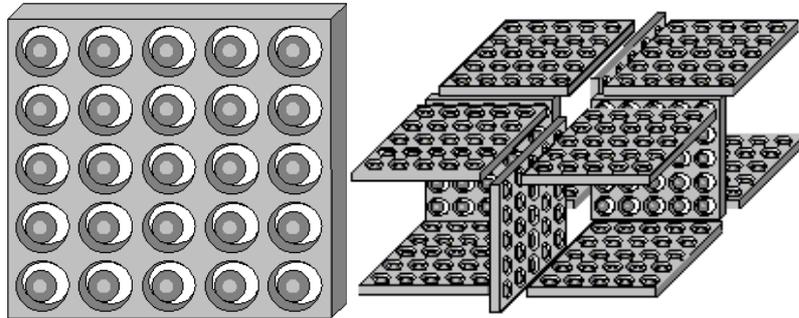


Figura 1-5 - Piatti per autotaratura

1.4.2 Altri Modelli di compensazione degli errori di geometria

Il modello di corpo rigido fino ad ora illustrato non è il solo applicabile, anzi in molti casi non è idoneo. Non è infatti sempre valida l'ipotesi di base, cioè la indeformabilità delle parti mobili della CMM e la variazione dei valori degli errori di geometria come sola funzione della posizione lungo l'asse lungo il quale si realizza il movimento del carro in esame.

La rigidità strutturale è inficiata dalla presenza di torsioni, flessioni, isteresi e giochi, di origine sia statica che dinamica. Inoltre possono intervenire fattori esterni, come variazioni di temperatura e vibrazioni.

Le torsioni sono tipicamente indotte dal mancato parallelismo delle guide di scorrimento quando l'organo mobile è vincolato ad esse in modo iperstatico.

Le flessioni sono tipicamente provocate dalla posizione dei carichi mobili su strutture a rigidità non infinita, dalla variabilità della massa dei differenti accessori e dei pezzi da misurare e dai cedimenti dei vincoli (pattini pneumostatici) quando sottoposti a variazioni dei carichi. Giochi e isteresi, dovuti alla imperfezione dei vincoli delle strutture, producono variazioni dell'assetto tra le stesse e quindi, da un punto di vista geometrico, degli errori di quadratura.

Se una macchina è sottoposta a gradiente termico, per esempio a causa di irraggiamento della parte superiore, si produce una variazione della sua configurazione geometrica con tutti gli effetti metrologici conseguenti. Nell'esempio citato si suppone che la temperatura della parte superiore della struttura sia maggiore di quella della parte inferiore. In questo caso se le superfici superiore ed inferiore fossero libere ed indipendenti si dilaterebbero di entità differenti, ma essendo al contrario vincolate tra loro, per riportarsi in equilibrio la struttura assume una forma curva provocando deformazioni locali. Quindi la struttura irraggiata dall'alto si deforma allungandosi, fenomeno consentito dai vincoli e abbastanza prevedibile, e distorcendosi, fenomeno che comporta variazioni degli errori angolari compensati difficilmente quantificabili a priori.

Le forze d'inerzia applicate alle masse strutturali in seguito ad accelerazioni dovute al moto ed a vibrazioni, provocano flessioni, torsioni, variazioni di assetto come già descritto.

Un caso particolarmente significativo di non-applicabilità del modello di corpo rigido è quello delle macchine a braccio orizzontale, le quali, per raggiungere prestazioni di un certo livello, necessitano di correzioni di errori di geometria supplementari.

1.5 Diagnostica e verifiche saltuarie

Le norme internazionali della serie ISO 10360 coprono in modo completo il settore delle verifiche in accettazione e periodiche delle CMM. A riguardo delle verifiche intermedie si forniscono solo alcune indicazioni generali di metodo, lasciando giustamente ai singoli utenti di specializzare le procedure secondo le proprie esigenze.

L'utente di una CMM si può trovare di fronte anche a necessità differenti, a cui le norme citate non forniscono risposte adeguate.

Alcune di queste esigenze particolari possono riguardare:

- progettazione di procedure di verifica intermedia; scelta degli artefatti e delle caratteristiche da tenere sotto controllo; scelta delle modalità di registrazione e valutazione dei parametri significativi;
- stima delle incertezze delle misure o verifica della compatibilità delle prestazioni effettive con le specifiche da controllare, per applicazioni differenti da quelle per cui sono indicati i massimi errori ammissibili della CMM o per cui sono superate le limitazioni operative specificate dai costruttori (temperatura, configurazione tastatore, etc);
- ricerca delle cause di errori di misura.

1.5.1 Verifiche intermedie

Lo scopo delle verifiche intermedie è quello di identificare e isolare rapidamente le CMM difettose prima che un numero significativo di particolari buoni sia scartato o viceversa. L'esecuzione frequente di verifiche intermedie incrementa il livello di confidenza circa le prestazioni degli strumenti tra due successive tarature o verifiche periodiche.

La verifica intermedia non sostituisce la taratura e normalmente non ha funzione diagnostica, ma ha solo lo scopo di confermare la validità della taratura indagando e rilevando le più comuni cause di errore delle CMM.

Una procedura di verifica intermedia efficace è idonea a controllare la macchina di misura, compresi i suoi sottoinsiemi utilizzati nelle normali operazioni, ed include quindi prove del sistema tastatore nel suo complesso, dei sistemi di compensazione della temperatura e delle eventuali tavole rotanti.

Il tempo che è possibile dedicare a questi controlli è in genere limitato, quindi occorre concentrare gli sforzi sulle cause d'errore più frequenti e probabili, verificandone la maggior quantità possibile con un numero minimo di misurazioni. Quando l'esito della attività di verifica periodica è negativo, possono essere necessarie attività supplementari, iniziando da

semplici prove a scopo diagnostico per finire con una nuova taratura da parte del servizio competente.

Ciascun utilizzatore di CMM ha esigenze particolari, pertanto le verifiche periodiche ed i campioni utilizzati per la loro applicazione sono differenti a seconda della situazione, pur essendoci regole generali comuni.

I campioni per verifiche intermedie non devono essere necessariamente tarati, ma la taratura consente di raccogliere utili informazioni aggiuntive. In tal caso è necessario che l'incertezza della taratura del campione sia piccola rispetto al limite di accettabilità della CMM. Anche nel caso in cui si utilizzino campioni di forma, la rugosità e l'errore di forma devono essere mantenuti sufficientemente piccoli.

Anche le caratteristiche termiche dei campioni sono importanti, qualora la temperatura ambientale sia differente dai 20°C. Il loro coefficiente di dilatazione deve essere il più simile possibile a quello dei pezzi misurati nella reale attività e deve essere noto con un'incertezza sufficientemente piccola.

Qualora sia normalmente attiva la correzione della dilatazione del pezzo in misurazione, la verifica deve essere eseguita nelle stesse condizioni per consentire il controllo del funzionamento dei sensori di temperatura (che possono essere soggetti a guasti non sempre evidenti, quali le derive dell'indicazione).

Una delle caratteristiche fondamentali degli artefatti utilizzati per le verifiche intermedie è la loro stabilità dimensionale a medio o lungo termine, allo scopo di potere confrontare i risultati delle prove con quelli ottenuti precedentemente. Tale stabilità deve essere garantita all'interno di un margine di molto inferiore al più piccolo errore della CMM, che sia significativo per l'utilizzatore.

Per garantire al meglio la comparazione dei risultati occorre curare al massimo la stabilità dell'artefatto di prova sul piano di lavoro della CMM, evitandone le deformazioni. Il campione deve in genere essere posizionato sempre nella stessa locazione rispetto al sistema di riferimento della macchina. Anche la strategia di misurazione, in particolare il numero, la distribuzione, la sequenza dei punti e gli algoritmi di calcolo, deve rimanere invariata.

Qualunque siano le strategie adottate, si raccomanda di eseguire almeno dieci cicli di verifica dopo la taratura della CMM, assumendo il valore medio delle misure ottenute come base di riferimento per i risultati delle verifiche successive. Anche la dispersione dei valori ottenuti può essere un utilissimo indicatore di base.

Si noti ancora che non necessariamente le verifiche intermedie devono essere eseguite su particolari artefatti o campioni di riferimento. Potrebbe benissimo essere utilizzato un particolare di produzione, sottoposto a normale controllo, ma verificato anche con un ciclo di collaudo dedicato a fornire qualche informazione dettagliata e significativa.

Verifiche di ripetibilità

Sono le modalità più semplici di esecuzione delle verifiche intermedie. Come si è detto, si utilizza sempre lo stesso particolare disposto nella stessa locazione/orientamento nel volume della CMM. Le caratteristiche scelte per la valutazione sono misurate alcune volte, e si tiene registrazione del valore medio e della dispersione dei dati. Allo scopo sono utili le carte di controllo per variabili, del tipo $X_{\text{medio}}-R$ oppure per individui.

Verifiche di riproducibilità

Poiché gli errori residui di geometria della CMM variano nel volume di misura, anche i risultati delle misurazioni saranno variabili in conseguenza. In funzione della posizione nel volume variano anche alcune caratteristiche della macchina che non producono errori sistematici, come gli attriti e gli effetti delle vibrazioni.

Il monitoraggio dei valori di caratteristiche specificate e delle relative differenze in funzione della locazione / orientamento del pezzo nel volume della CMM fornisce indicazioni più complete circa il mantenimento della condizione metrologica.

Verifiche di capacità

Sono attività ad un livello di approfondimento maggiore che non le verifiche intermedie, e sono mirate a verificare l' idoneità di procedure ed attrezzature al raggiungimento dei risultati. Ovviamente le tecniche predisposte ed i risultati della loro applicazione possono essere utilizzati anche come monitoraggio.

Alcuni esempi di tali verifiche sono:

- verifica dell' idoneità dell' attrezzaggio
- verifica dell' effetto della massa del pezzo
- ottimizzazione della strategia di misurazione

Artefatti per le verifiche intermedie

Le strategie applicabili per la scelta dell' artefatto di prova possono essere numerose ma sono riconducibili a due categorie essenziali:

- il particolare è scelto in modo da rappresentare il più fedelmente possibile i pezzi realmente misurati;
- il particolare è scelto tra quelli appositamente progettati per la verifica delle prestazioni delle macchine di misura a coordinate.

La prima tra le due possibilità si applica alle macchine che misurano normalmente uno stesso tipo di particolare reale o un serie di particolari simili per forma e differenti solo per dimensioni. In casi del genere si può addirittura utilizzare un particolare reale come pezzo di prova, in quanto esso ha sicuramente la massima sensibilità agli errori della CMM più critici per l' applicazione.

Le misurazioni di tale pezzo devono essere eseguite in modo da coinvolgere una parte significativa del volume della macchina utilizzato nella pratica corrente, per cui se il pezzo è di piccole dimensioni sarà opportuno eseguire la stessa prova in differenti locazioni ed orientamenti nel volume di misura.

Il ciclo di misurazione del particolare di prova può essere parziale, coinvolgendo solo le caratteristiche dimensionali e di forma più significative e critiche, ed applicando, per la valutazione dei risultati, le tolleranze più critiche tra quelle da verificare in pratica.

La maggiore limitazione di questo modo di procedere consiste nella validità dei risultati che è limitata a particolari eguali o simili a quelli utilizzati per la verifica.

Nel secondo caso si utilizzeranno invece artefatti "general purpose" che vengono progettati specificatamente per evidenziare i più comuni difetti delle CMM. Gli artefatti utili per questo tipo di verifica sono le ball bar, i calibri a passi (step gauge) e i piatti ad elementi geometrici, in genere sfere o fori.

1.6 La diffusione della conoscenza e dell'utilizzo delle norme

1.6.1 Introduzione

“L’ambiguità delle specifiche delle CMM rende la valutazione comparata delle performance molto difficile. Per questo fatto, e crescendo l’utilizzo delle CMM, il comitato ASME stabilì di approntare uno standard industriale per semplificare e chiarire le specifiche delle prestazioni. Nell’ottobre del 1978 in sede di riunione del comitato fu istituito il gruppo di lavoro B89.1.12...”.

La citazione è tratta dalla prefazione alla norma ASME B89 del 1990 e ricorda che all’inizio degli anni '80 la determinazione delle prestazioni delle macchine di misura era un grave problema: i diversi costruttori indicavano valori che rispondevano a modalità di verifica non standardizzate e neppure molto note agli utilizzatori. In questa situazione era difficile effettuare confronti di prestazioni tra i diversi modelli delle case costruttrici, ed era impensabile poter stimare a priori la prestazione della macchina in una particolare applicazione. La situazione divenne insostenibile ad un punto tale, che perfino i costruttori decisero di istituire un comitato di studio che avesse come obiettivo la preparazione di una norma di riferimento per la verifica delle prestazioni. Da allora le norme aventi lo scopo di prescrivere modalità di esecuzione di prove e di valutazione di risultati per la verifica delle prestazioni delle CMM sono divenute fin troppo numerose. La Tabella 1-1 che segue riporta l’elenco di quelle principali prodotte a partire dai primi anni '80.

Anno	Norma	Paese
1982	CMMA	Europa
1983	VDI/VDE 2617-1	Germania
1985	B89	USA
1986-87	VDI/VDE 2617-2	Germania
1986-87	BS 6808	GB
1986-87	AFNOR	Francia
1986-87	JIS	Giappone
1989	VDI/VDE 2617-3 e VDI/VDE 2617-4	Germania
1990	VDI/VDE 2617-5	Germania

Tabella 1-1 - Principali normative dagli anni '80

Si è finito quindi per disporre di troppa abbondanza, generando nuova confusione. In alcuni casi le prescrizioni di queste norme sono in assoluto contrasto, in molti altri lo stesso concetto viene applicato con variazioni di metodo. I campioni proposti per la verifica sono molteplici: laser interferometrici, blocchetti piano paralleli, barre bisfera, anelli, sfere, coni, calibri a passi, e oggi, piatti a sfere e barre multisfera componibili e tarate.

Nel contempo si assiste alla nascita di altre norme, emesse dai grandi gruppi industriali, aventi lo scopo di unificare e di coordinare l'attività di acquisto e verifica nei diversi stabilimenti.

1.6.2 Cenni storici

La grande maggioranza degli utilizzatori delle macchine di misura a coordinate degli anni '80 ha una conoscenza superficiale del prodotto, per cui la valutazione dello stesso avviene di regola sulle sole prestazioni standard descritte nei cataloghi e con riferimento alla normativa disponibile.

È solo a partire da metà anni '90 che si comincia ad assistere alla diffusione di un diverso modo di condurre la ricerca da parte degli utilizzatori e degli acquirenti. Il prodotto comincia ad essere valutato anche in funzione dell'uso specifico che se ne vuole fare e si inizia a porre al costruttore la richiesta di risolvere un problema di misura.

Viene posta maggiore attenzione all'ambiente in cui la macchina deve operare e ci si pone il problema del suo inserimento nel parco di strumenti gestiti in accordo alle norme ISO della serie 9000.

Gli utilizzatori sono aiutati in questo dalla normativa a disposizione che si preoccupa sempre più di individuare prove efficaci nel valutare le reali prestazioni delle CMM, per come sono usate, e che mette a disposizione, anche sotto forma di guide e pubblicazioni tecniche, una sempre più completa informazione sulla fonte di errori di misura da parte delle macchine di misura.

Ed è proprio al culmine di un rapido processo di evoluzione tecnica del prodotto e della normativa relativa alle macchine di misura, che si assiste alla nascita di specifiche interne preparate da gruppi industriali sulla base di esperienze e studi condotti a livello nazionale.

I documenti normativi tendono a differenziare i concetti di "verifica delle prestazioni" e "taratura".

La verifica delle prestazioni è da effettuarsi con metodi convenzionali, sia pure rigorosi, ed ha essenzialmente lo scopo di fornire modalità di valutazione da utilizzare come riferimento. Ma la conoscenza vera delle incertezze associate alle misure si ottiene solo con l'analisi dei fattori di influenza sul processo di misurazione, per cui per ogni singola applicazione devono essere individuate, quantificate e composte le singole componenti d'errore.

Questo per certi aspetti significa riconoscere che non esistono formule generali valide per tutte le applicazioni, ma al contrario ogni applicazione richiede un'analisi specifica.

La situazione è molto migliorata con l'emissione della norma ISO 10360-2, nel 1994. Tale documento è ancora molto discusso da parte della stessa ISO, ma ha comunque il vantaggio di essere il primo documento internazionale sulle modalità di verifica delle prestazioni delle CMM.

Questo processo di studio, sperimentazione e formazione non è ancora terminato anche se a livello internazionale è presente la norma ISO 10360 che cerca di appianare i contrasti dovuti a influenze culturali, storiche e industriali, le quali rendono difficile la preparazione di una norma completa e universalmente accettata.

Infatti la nuova organizzazione ISO delle norme operative nel settore della metrologia, che devono essere tutte coerenti nell'ambito di un progetto GPS (Geometrical Product Specification) anche per quanto riguarda la valutazione dell'incertezza, ha rivoluzionato il panorama esistente. Le norme ISO attuali sono sicuramente i documenti del settore più moderni ed aggiornati. Esiste comunque un'ampia e variegata disponibilità di documenti :

- Norme Internazionali e Nazionali (ISO, UNI)
- Guide emesse da Organizzazioni tecnico-scientifiche, spesso utilizzate come Norme (VDI)
- Documenti di riferimento pubblicati da Organismi di Coordinamento (BIPM, EA)
- Articoli pubblicati su riviste del settore
- Monografie presentate in Seminari o Convegni.

Si noti che l'utilizzo delle differenti Norme è spesso determinato da motivazioni commerciali più che scientifiche. In Cina infatti sono applicate le norme VDI/VDE in quanto le Ditte tedesche sono state tra le prime a porsi sul mercato ottenendo la certificazione di prodotto dagli Enti Locali.

L'attenzione si è successivamente spostata dalle sole caratteristiche geometriche tipiche delle macchine utensili alle prestazioni per misure di lunghezza, e poi alla ripetibilità e riproducibilità di queste. Si è analizzato l'effetto dell'ambiente, si sono definite le caratteristiche di accuratezza dei campioni utilizzati per le verifiche, si sono introdotte modalità statistiche per dare ai risultati validità più estesa. Sono state scritte procedure per la verifica dei componenti ed accessori essenziali, quali i tastatori e le tavole rotanti, si sono iniziati gli studi per la descrizione delle macchine a coordinate per mezzo di modelli cinematici e termodinamici.

Tutta questa attività ha comunque prodotto molti vantaggi, tra cui la diffusione della conoscenza di questi strumenti di misura complessi e versatili e al giorno d'oggi esiste una conoscenza molto approfondita e diffusa delle problematiche connesse all'uso delle macchine di misura a coordinate.

1.6.3 Le norme

1.6.3.1 La norma CMMA

La norma CMM consiste in una serie di prescrizioni su come e dove misurare gli errori di linearità e quadratura degli scorrimenti e l'errore di posizione della testa di misura, l'errore commesso durante la misura di lunghezza di elementi standard. In particolare è previsto l'uso di 3 blocchetti piano paralleli per un numero totale di misure pari a 36.

La CMMA è molto rigorosa in termini metrologici.

Il tentativo di standardizzare il software per quanto riguarda il formato di output è solamente abbozzato e non produce risultati.

Nella revisione del 1989 i controlli di geometria sono inseriti come opzionali e viene introdotta una prescrizione per la verifica delle prestazioni delle macchine di misura equipaggiate con tavola rotante.

Tale norma è disponibile e applicata dal 1982, scritta in inglese e tradotta in francese, tedesco e italiano.

Il gruppo di lavoro CMMA era composto da un limitato numero di costruttori principalmente europei di macchine di misura, i quali avevano come obiettivo concordare velocemente su una proposta comune e una norma la cui applicazione fosse poco costosa in termini di tempo.

L'attività del comitato CMMA rallenta nei primi anni '90 a causa dell'abbandono da parte degli inglesi e dei tedeschi. Questi ultimi, infatti, sono maggiormente interessati a produrre ed applicare le norme VDI che sono sufficientemente complete e diffuse. Essi inoltre sono gli ispiratori della norma ISO 10360 che ha lo stesso scopo di normalizzare le verifiche delle prestazioni delle CMM.

1.6.3.2 La norma giapponese JIS (1987)

Tale norma è pesantemente ispirata alla norma tedesca VDI e cita a riferimento anche la CMMA e la B89.

Prevede la valutazione delle macchine di misura a coordinate misurando blocchetti piano paralleli o calibri a gradini e verificando anche gli errori di geometria tipici e gli errori di indicazione.

1.6.3.3 La norma inglese BSI 6808 - parte 2 (1987)

La norma inglese prevede la verifica delle prestazioni utilizzando campioni di lunghezza tarati, blocchetti piano paralleli, calibri a gradini o ball bar.

Si devono eseguire 50 misure, che possono essere 10 lunghezze misurate 5 volte ciascuna o 5 lunghezze misurate 10 volte, in 8 posizioni e orientazioni differenti.

È ammesso scartare 2 valori su 50.

Essa prevede inoltre di verificare la ripetibilità unidirezionale e di valutare l'effetto della temperatura con una metodologia uguale a quella della B89.

I risultati della prova, per definire il massimo errore sulla misura di lunghezza commesso dalla macchina, sono valutati con modalità statistiche.

1.6.3.4 La norma ASME B89

B89.1.12M:1990

Il comitato B89 è composto da costruttori, utilizzatori e esperti indipendenti, suddivisi in sottogruppi, che si occupano di argomenti diversi: dalle grandi macchine alle attrezzature, dalla scansione alla manutenzione, dai campioni di riferimento ai software.

L'obiettivo è realizzare una norma rigorosa, educativa e non criticabile, e tale norma è talmente dettagliata da risultare un vero e proprio manuale.

È inizialmente fondata su un concetto innovativo: quello di verificare l'uniformità delle prestazioni delle macchine di misura a coordinate misurando uno stesso oggetto non tarato (una ball bar) in differenti posizioni del volume di lavoro.

La tolleranza è espressa da un solo valore numerico che rappresenta la massima dispersione dei valori misurati dalla macchina.

È previsto inoltre di degradare, di un valore percentuale calcolato, le prestazioni da verificare quando le condizioni ambientali in cui opera la macchina siano peggiori di quelle ammesse dal costruttore e provochino esito negativo di una prova appositamente specificata e consistente nel misurare le variazioni delle coordinate del centro di una sfera misurata per un tempo sufficientemente lungo.

Nella versione del 1990 il documento B89 è completo e prevede prove per valutare:

- l'effetto delle condizioni termiche ambientali,
- l'effetto delle vibrazioni,
- le prestazioni della macchina con prove specifiche riguardanti l'isteresi, la ripetibilità, la corretta taratura delle scale o riferibilità, le performance con le ball bar, le prestazioni in misura bidimensionale, le prestazioni dell'utensile tastatore, le prove speciali per macchine di grandi volumi e le prove per macchine con tavola rotante.

Il documento inoltre prevede appendici con informazioni sulle attrezzature da utilizzare e commenti ai concetti essenziali espressi nella norma.

È ancora a livello di bozza la parte che riguarda la verifica delle macchine costituite da due sistemi coordinati indipendenti ma correlati tra loro.

La B89 circola a livello preliminare dal 1983 ma viene emessa solo nel 1985 in lingua inglese.

B89.4.1:1995

La norma ASME B89.4.1 è un documento ampio e completo, che contiene un dizionario di termini, una classificazione dei tipi di macchine, informazioni sulle caratteristiche della strumentazione necessaria e indicazioni su prove specifiche quali la verifica dell'effetto delle variazioni di temperatura e la verifica del sistema tastatore.

Per quanto riguarda la geometria della CMM, le prove prescritte riguardano la verifica della ripetibilità, della linearità delle scale ottiche, della precisione geometrica nel volume di misura, della prestazione in misurazioni di lunghezza bidirezionali.

1 - Verifiche della geometria

- Ripetibilità

Si eseguono dieci sequenze di misurazione di una sfera, approssiata per quattro punti, calcolando ogni volta le coordinate X, Y e Z del centro.

Per ciascuna delle coordinate si verifica la dispersione dei dieci valori e si assume la massima delle tre come risultato della prova. Per grandi macchine, al fine di verificare l'effetto dinamico prodotto dalle grandi masse in movimento, si prescrive di eseguire la prova sia con due differenti velocità di misura, la prima minore del 120 % della velocità di misura prescritta, la seconda maggiore del 90% della velocità di spostamento prescritta, sia in più di una posizione nel volume di misura, ossia una posizione ogni 20 m³ di volume di lavoro.

- Linearità

La CMM viene verificata lungo ciascuno dei tre assi coordinati, mantenendo i due assi non coinvolti nella prova al centro della corsa di lavoro. Si verifica la precisione della posizione raggiunta dalla macchina utilizzando un campione di riferimento, mediando il risultato di tre

prove consecutive con approccio unidirezionale. I passi di campionamento dipendono dalla lunghezza della corsa utile e variano da 25 mm a 100 mm.

Come riferimento si può utilizzare un interferometro laser o un calibro a passi, applicando al primo le correzioni alla lunghezza d'onda per effetto delle condizioni ambientali ed al secondo le correzioni per la differenza dai 20°C, sia del calibro sia della riga ottica.

Si verifica la dispersione degli errori di posizione, ossia la differenza tra lo scostamento massimo e quello minimo dell'indicazione della CMM dal campione.

- Prestazioni volumetriche

Si utilizza la ball-bar (o barra bisfera), un attrezzo costituito da una barra con due sfere alle estremità. La barra è posta in differenti posizioni (locazioni ed orientazioni) nel volume della macchina, in numero variabile tra 20 e 35, in funzione del volume di misura. In ciascuna posizione è misurata la distanza tra i centri delle due sfere. Le dimensioni della ball bar sono leggermente inferiori alla dimensione utile del più corto dei tre assi della CMM.

Anche in questo caso si valuta la dispersione, ossia la differenza tra il massimo ed il minimo dei valori di lunghezza misurati.

Per le macchine di grandi dimensioni, si usa una ball-bar di 900 mm di lunghezza, in sole dieci posizioni, più una supplementare ogni 10 m³ di volume oltre i 20 m³. In supplemento si ha la verifica dell'errore di posizione con un laser interferometrico, lungo quattro direzioni diagonali nel volume e due direzioni assiali, che sono quelle non parallele all'asse che muove il tastatore.

- Prestazione di misura bidirezionale

Per la verifica di questa prestazione si misura la lunghezza di un blocchetto piano parallelo tarato, di lunghezza compresa tra 25 mm e 100 mm, in quattro posizioni o direzioni: tre parallele agli assi ed una sghemba rispetto ad essi. Si valuta il massimo scostamento tra l'indicazione della CMM e il valore vero della lunghezza del campione materiale, presente nel relativo certificato di taratura.

- Macchine con tavola rotante

Anche la norma ASME B89.4.1 prevede prove particolari per le CMM con tavola rotante, in modo analogo a quanto previsto dalla norma ISO 10360-3.

2 - Verifica del tastatore

- Ripetibilità del Sistema

In realtà la ANSI/ASME B89 inserisce la verifica di seguito descritta nel capitolo dedicato alle prove della macchina di misura e non del tastatore. Ma la stessa norma asserisce che l'errore di ripetibilità comprende gli effetti dovuti alla macchina di misura, all'operatore, agli algoritmi, e quindi ovviamente anche al tastatore.

Si definiscano quindi le condizioni operative, compresa la direzione dello stilo, in generale assunta parallela all'asse Z della CMM.

La sfera di riferimento viene misurata per quattro punti, il più largamente ed uniformemente distribuiti sulla sfera stessa e vengono calcolate le coordinate del centro della sfera.

Si ripete il ciclo per dieci volte e si calcola la dispersione, intesa come differenza tra il valore massimo e quello minimo, delle coordinate X, Y e Z. Si assume il massimo di questi valori come valore della prova.

- Tastatore singolo

La verifica non può prescindere dal fatto che l'effetto visibile è dovuto al contributo complessivo del tastatore e della sua configurazione, del comportamento dinamico della CMM e di altri parametri. La verifica è idonea per tastatori sia trigger sia proporzionali che operano nella modalità punto-punto.

Le misurazioni devono essere eseguite utilizzando gli stessi parametri e, in particolare, le medesime velocità di misurazione e distanza di approccio specificate per le normali operazioni. La posizione nel volume della CMM è quella in cui le variazioni di temperatura hanno la massima influenza.

Si utilizza una sfera di diametro 6 mm, con errore di forma non superiore ad un quinto della tolleranza definita per la ripetibilità del tastatore.

La prova di seguito descritta deve essere ripetuta con tre differenti configurazioni del tastatore:

- con uno stilo diritto di lunghezza 10 mm;
- con uno stilo diritto di lunghezza 50 mm;
- con uno stilo "a L" con i bracci di lunghezza pari a 50 mm lungo la direzione dell'asse Z e pari a 20 mm in direzione perpendicolare all'asse Z. Questa configurazione non è realizzabile con tutte le CMM presenti sul mercato.

Tutti i tastatori terminano con sfera di qualsiasi diametro utilizzabile, ma con valore prefissato di 6 mm.

Sulla sfera vengono tastati 49 punti secondo una distribuzione stabilita dall'utilizzatore, ma seguendo una modalità predefinita e rappresentata in Figura 1-6:

1. 12 uniformemente distribuiti su una circonferenza avvicinabile con lo stilo del tastatore a 100° rispetto alla direzione utilizzata per avvicinare il polo della sfera;
2. 12 su una circonferenza equatoriale, a 90°, ma sfasati di 10° rispetto ai precedenti;
3. 12 su una circonferenza avvicinata col tastatore a 60°, col primo punto sfasato di 10° rispetto alla distribuzione precedente;
4. 12 nelle medesime condizioni, ma col tastatore a 30°;
5. 1 sul polo della sfera.

Si calcolano quindi i valori delle distanze radiali tra ciascuno dei 49 punti ed il centro della sfera elemento sostitutivo determinato utilizzando le procedure consigliate dal costruttore della CMM. Il parametro da confrontare con la specifica del costruttore è la differenza tra i valori estremi, ossia tra il valore massimo e quello minimo, delle 49 distanze radiali.

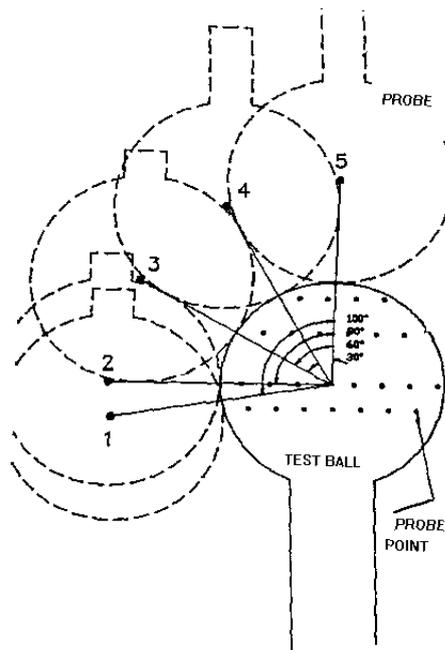


Figura 1-6 - Test del tastatore secondo la norma ANSI/ASME B89

- Tastatore multiplo

Nell'ultima revisione sono state introdotte modalità per la verifica del tastatore multiplo. Le modalità di attrezzaggio ed operative sono le stesse descritte al paragrafo precedente, ma in questo caso si realizza una configurazione a cinque tastatori, quattro con gli assi nel piano ortogonale all'asse Z della CMM e uno a 90° rispetto agli altri, parallelo all'asse Z della CMM e passante per l'intersezione degli assi dei quattro tastatori già definiti.

La sfera di prova deve essere misurata con venticinque punti, cinque con ciascuno dei tastatori qualificati realizzando distribuzioni fisiche regolari e il più possibile ampie. Si calcola nuovamente la massima differenza tra i raggi determinati da ciascuno dei venticinque punti e dal centro della sfera elemento sostitutivo definita dagli stessi.

1.6.3.5 La norma tedesca VDI/VDE 2617 (1983-2006)

La VDI/VDE 2617 è composta da 13 parti e specifica le caratteristiche necessarie a descrivere l'accuratezza delle macchine di misura e i metodi per verificare tali caratteristiche.

Si tenga presente che molte di esse sono state recepite quasi integralmente nelle corrispondenti ISO e che di alcune di esse esiste solo la versione in tedesco.

Nella prima sono fornite definizioni di carattere generale sulle cause d'errore delle macchine di misura e sulla loro metrologia.

Nella seconda è definita la modalità di verifica delle prestazioni delle CMM con blocchetti piano paralleli o calibri a gradini, applicando la ISO 10360-2.

Nella terza sono indicate le modalità per la verifica degli errori di geometria e per la valutazione delle performance del tastatore.

Nella quarta è prescritta la modalità della verifica delle tavole rotanti, applicando la ISO 10360-3.

Nella quinta è indicata la procedura per la verifica periodica delle CMM, anche a mezzo di un artefatto, ad esempio un piatto a sfera.

Nella sesta parte sono descritte le macchine di misura a coordinate con sensori ottici di distanza ed è presente una guida per applicare la ISO 10360-2 a tali macchine.

Nella settima parte sono presenti le indicazioni per la stima dell'incertezza di misura delle macchine di misura a coordinate.

Nell'ottava parte la guida descrive un metodo per valutare la procedura di verifica delle macchine di misura in termini di adeguatezza, con riferimento alla ISO 14253-1.

Nella nona parte, vengono definiti i parametri per valutare le prestazioni dei bracci di misura articolati, i campioni di riferimento e le posizioni dei campioni.

Le ultime quattro parti sono ancora solo in lingua tedesca e trattano, nell'ordine, i laser tracker, la determinazione dell'incertezza di misura della macchine di misura a coordinate utilizzando un budget d'incertezza, le CMM a contatto per misure micro geometriche e l'applicazione della ISO 10360 a CMM con sensori CT (tomografia computerizzata).

Esse sono ancora in fase di pubblicazione.

Di seguito di riporta l'elenco di tali norme.

- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 1: 1986-04
Accuracy of coordinate measuring machines; characteristics and their checking; generalities
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 2.1: 2001-10 (prima edizione 1986-12)
Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification - Code of practice for the application of DIN EN ISO 10360-2 for length measurement
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 2.2: 2000-07
Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification - Form measurement
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 2.3: 2001-12
Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines of large dimensions
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 3: 1989-05
Accuracy of coordinate measuring machines; characteristic parameters and their checking; components of measurement deviation of the machine
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 4: 1989-09
Accuracy of coordinate measuring machines; characteristics and their checking; rotary tables on coordinate measuring machines
- ✓ VDI-Richtlinie: VDI/VDE 2617 Blatt 5: 2001-11
Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristic parameters and their verification - Interim check with artefacts
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 5.1: 2000-09
Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification - Interim check with ball plates
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 6: 1997-12
Accuracy of coordinate measuring machines; characteristic parameters and their checking - Coordinate measuring machines with optical probes - Basics
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 6.1: 1998-06

- Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristic parameters and their checking - Coordinate measuring machines with optical probes - Sensors for 2D measurement
- ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 6.2: 1999-02
Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristic parameters and their checking - Coordinate measuring machines with optical probes - Optical sensors for one-dimensional distance measurement
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 6.3: 2008-12
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Koordinatenmessgeräte mit Multisensorik
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 7: 2001-08
Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their checking - Estimation of measurement uncertainty of coordinate measuring machines by means of simulation
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 8: 2006-07
Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their testing - Test suitability of measurements with coordinate measuring machines
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 9: 2009:06
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrößen und deren Prüfung Annahme- und Bestätigungsprüfung von Gelenkarm-Koordinatenmessgeräten (Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their reverification - Acceptance and reverification tests for articulated arm coordinate measuring machines) (solo in lingua tedesca)
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 10 : 2009-02
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Annahme und Bestätigungsprüfung von Lasertrackern (Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their checking - Acceptance and reverification tests of lasertrackers) (solo lingua tedesca)
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 11 : 2009-07
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Ermittlung der Unsicherheit von Messungen auf Koordinatenmessgeräten durch Messunsicherheitsbilanzen Weitere Informationen beim VDI (Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their checking - Determination of the uncertainty of measurement for coordinate measuring machines using uncertainty budgets) (solo lingua tedesca)
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 12.1 : 2009-02
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Annahme- und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräten zum taktilen Messen von Mikrogeometrien (Accuracy of coordinate measuring machines - Characteristics and their checking - Acceptance and reverification tests for tactile CMM measuring microgeometries) (solo lingua tedesca)
 - ✓ VDI/VDE 2617 Blatt 13;VDI/VDE 2630 Blatt 1.3; VDI/VDE 2617 Blatt 13:2009-08
VDI/VDE 2617 Blatt 13
Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung; Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren - VDI/VDE 2630 Blatt 1.3: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik; Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren (VDI/VDE 2617 Blatt 13: Accuracy of

coordinate measuring machines - Characteristics and their testing; Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors - VDI/VDE 2630 Blatt 1.3: Computed tomography in dimensional measurement; Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors) (solo lingua tedesca)

Si riferisce brevemente del contenuto di alcune norme della serie.

1.6.3.5.1 La norma VDI/VDE 2617-2.1 (1986)

La norma VDI/VDE 2617-2.1 nella versione del 1986 prevede di verificare la precisione di misura su lunghezze utilizzando blocchetti pianparalleli, calibri a passi o laser interferometrici. Si definiscono i simboli U1, U2 e U3 relativi rispettivamente a:

incertezza unidirezionale, da verificarsi con i calibri posti lungo le direzioni X , Y, Z;
incertezza bidirezionale, da verificarsi con i calibri disposti inclinati nei piani XY, XZ e YZ;
incertezza tridirezionale, da verificarsi con i calibri disposti inclinati lungo le quattro diagonali volumetriche.

In ciascuna delle dieci direzioni si devono eseguire almeno 50 misurazioni su almeno 5 calibri di differente lunghezza.

L'utilizzo del laser è previsto con una metodologia particolare, detta block method, per cui l'acquisizione del dato dal sistema interferometrico è comandata dalla presa punto del sistema tastatore della CMM, a cui è assemblato il riflettore del laser.

1.6.3.5.2 La norma VDI/VDE 2617-3 (1989)

- Verifica delle prestazioni per misurazioni dimensionali

La norma specifica la modalità per verificare l'accuratezza di posizione per mezzo dell'interferometro laser sia con la modalità di valutazione statistica secondo un'altra norma tedesca, la VDI 3441, sia con il metodo cosiddetto a farfalla. La modalità statistica prevede l'esecuzione di almeno cinque serie di rilevamenti, con calcolo di errori di inversione U e dello scarto tipo s, e stima dell'errore di posizione come :

$$\text{valore medio} \pm \left(3s + \frac{U}{2} \right)$$

Il campionamento dei dati può avvenire in tre modalità differenti, definite:

- ✓ lineare, ossia il tradizionale andata e ritorno con fermata su tutti i punti di controllo;
- ✓ quasi-pilger, ossia andata e ritorno tra due punti di controllo adiacenti;
- ✓ pendolo, ossia andata e ritorno con extracorsa sullo stesso punto di controllo.

Le differenti modalità di esecuzione sono influenzate in modo differente dalle variazioni di temperatura. L'ultima, in particolare, mostra l'effetto della temperatura come un andamento di errori sistematici e si presta molto bene a collaudi di durata non piccola in ambiente sfavorevole.

Il metodo a farfalla è ideale per un controllo con mezzi grafici, permettendo di tracciare su un grafico gli errori rilevati in ciascun punto di campionamento e di verificare che siano contenuti in una maschera a forma di farfalla, traslata ma non ruotata lungo gli assi X e Y del diagramma e rappresentante la formula binomiale:

$$A + B \cdot L$$

Per il controllo di rotazioni, traslazioni (rettilineità) e quadrature non si presentano novità degne di nota, si segnala tuttavia che in tutti i casi si prevede di eseguire una serie di misurazioni ripetute i cui valori devono tutti rientrare nelle tolleranze.

- Verifica del tastatore

Incertezza di tastatura 3D (V3)

Si effettua utilizzando una sfera di diametro compreso tra 20 mm e 30 mm, con errore di forma non superiore ad un quinto della specifica da verificare. Si misurano su di essa cinquanta punti uniformemente distribuiti sulla semisfera approcciabile. Si calcolano le coordinate del centro ed il valore del raggio della sfera elemento sostitutivo. Si determinano, quindi, i valori delle distanze dei punti misurati dal centro della sfera e le deviazioni dei cinquanta valori calcolati dal raggio della sfera elemento sostitutivo. Si assume come errore di tastatura 3D la massima delle deviazioni.

Incertezza di tastatura 2D (V2)

Si effettua utilizzando un anello di diametro compreso tra 20 mm e 30 mm, con errore di forma non superiore ad un quinto della specifica da verificare. Si misurano su di esso cinquanta punti uniformemente distribuiti. Si calcolano le coordinate del centro ed il valore del raggio della circonferenza elemento sostitutivo dell'anello. Si determinano, quindi, i valori delle distanze dei punti misurati dal centro dell'anello e si determinano le deviazioni dei cinquanta valori calcolati da quello del raggio della circonferenza. Si assume come errore di tastatura 2D la massima delle deviazioni. La prova deve essere eseguita disponendo l'anello nei tre piani coordinati della CMM.

Incertezza di tastatura 1D (V1)

Si misura cinquanta volte la distanza tra due superfici piane parallele, e si calcola il valore medio di esse. L'incertezza di tastatura è la massima differenza tra i valori misurati ed il valore medio. La prova deve essere ripetuta allineando l'elemento di prova a ciascuno dei tre assi coordinati.

1.6.3.5.3 La norma VDI/VDE 2617-4 (1989)

La norma definisce gli spostamenti f_a e f_r , rispettivamente assiale e radiale del centro tavola, ed f_w , angolare, dell'asse di rotazione di una tavola rotante. Prevede di misurare in differenti posizioni angolari della tavola il centro di due sfere a distanza 206 mm dal centro di rotazione, una sul piano tavola e l'altra a 206 mm di altezza.

La variazione delle coordinate del centro delle sfere è teoricamente nulla in quanto il sistema di riferimento della CMM è aggiornato sulla posizione angolare teorica della tavola stessa. Le massime variazioni in direzione radiale, tangenziale ed assiale dei centri sfera dalla posizione teorica sono assunti come errori da confrontare con le specifiche, rispettivamente U_r , U_t e U_a .

1.6.3.6 La norma ISO 10360

Si elencano le norme della serie ISO 10360 attualmente in uso:

- ✓ ISO 10360-1:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 1: Vocabulary
- ✓ ISO 10360-2:2009 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 2: CMMs used for measuring linear dimension
- ✓ ISO 10360-3:2000 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
- ✓ ISO 10360-4:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 4: CMMs used in scanning measuring mode
- ✓ ISO 10360-5:2000 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 5: CMMs using multiple-stylus probing systems
- ✓ ISO 10360-6:2001 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 6: Estimation of errors in computing Gaussian associated features
- ✓ ISO/DIS 10360-7 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -- Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems
- ✓ ISO/CD 10360-8 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -- Part 8: CMMs with optical distance sensors
- ✓ ISO/CD 10360-9 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -- Part 9: CMMs with multiple probing systems

1.6.3.6.1 La norma ISO 10360-1 : 2000 – Terminologia

La norma chiarisce il significato dei termini, non più spiegato nei documenti successivi e sono inoltre descritte le tipologie di CMM, con schema funzionale ed esempio di realizzazione.

Particolarmente significativa risulta la terminologia relativa al tastatore.

Di seguito vengono riportate alcune definizioni dei termini maggiormente utilizzati.

Il sistema tastatore è costituito da una sonda e, quando presenti, da prolunghie della sonda, sistema cambio sonda, stilo, sistema cambio stilo, prolunghie dello stilo.

La sonda o probe è il dispositivo che genera il segnale durante la tastatura.

Il sistema tastatore può essere costituito da più di una sonda, nel qual caso si parla di sistema a sonde multiple. Oppure può essere articolato, cioè può essere orientato in differenti posizioni angolari spaziali per mezzo di un dispositivo manuale o motorizzato.

Per essere utilizzato, un sistema tastatore deve essere qualificato, cioè si devono identificare opportuni parametri necessari alle successive attività di misurazione. Uno di questi è la costante di traslazione dell'elemento tastatore, cioè la serie di coordinate relative del centro di un elemento tastatore dello stilo rispetto ad un riferimento stabilito in un sistema di riferimento macchina.

Un sistema tastatore può essere configurato a stili multipli, nel qual caso comprende più di un sistema stilo, con uno o più stili, o un sistema stilo con più di uno stilo. Lo stilo è un dispositivo meccanico costituito da un'asta e da un elemento tastatore dello stilo, l'elemento fisico che stabilisce il contatto con il pezzo.

La tastatura è l'azione che ha come esito la determinazione di valori di coordinate. Essa può essere realizzata mediante punti discreti, dove la registrazione di un punto di misura indicato è effettuata direttamente dopo avere lasciato un punto intermedio, oppure mediante scansione, per registrare punti di misura consecutivi.

Il punto di misura indicato è un punto specificato di un sistema tastatore per il quale sono indicate le coordinate nell'istante in cui avviene la tastatura.

Il punto di misura corretto è la stima di un punto sulla superficie di un pezzo, basata su di un punto di misura indicato.

Il punto di misura indicato è traslato in un punto di misura corretto tramite un vettore di correzione dell'elemento tastatore.

Il punto di contatto bersaglio è il punto di contatto desiderato su di un elemento geometrico integrale nominale (superficie teoricamente esatta – vedasi ISO 14660-1).

Il punto di contatto reale è il punto di contatto tra elemento tastatore dello stilo ed elemento geometrico reale (elemento geometrico integrale, parte di una superficie reale).

1.6.3.6.2 La norma ISO 10360-2 : 2001 – Verifica di prestazioni

- Scopo e campo di applicazione

La verifica delle prestazioni della macchina viene effettuata mediante la misura di una serie di elementi campioni di lunghezza, come i blocchetti piano paralleli o i calibri a passi: 5 elementi misurati 3 volte in 7 posizioni diverse del volume di lavoro della macchina. Si applica a misurazioni di dimensioni.

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

La norma ISO 10360-2:2001 è la norma fondamentale che regola la verifica delle prestazioni e l'assicurazione della qualità nel settore delle macchine di misura a coordinate. Essa ne definisce i test di accettazione e di verifica periodica, utili rispettivamente per accettare un sistema di misura all'acquisto o dopo un intervento manutentivo, verificando le prestazioni in conformità alle dichiarazioni del costruttore e per controllare periodicamente le prestazioni del sistema di misura, anche ai fini dell'assicurazione qualità.

Sono previste verifiche periodiche da effettuarsi con lo stesso campione di riferimento e, saltuariamente, con artefatti dalle caratteristiche dimensionali differenti da quelle dei campioni utilizzati per le verifiche di accettazione e periodiche: barre a sfera, oggetti tridimensionali rappresentativi di elementi geometrici tipici, piatti a sfere.

La Norma cita a riferimento la ISO 14253-1 e la ISO 14660-1 (Geometrical Product Specifications – General terms and definitions)

Allo stato attuale il campo di applicazione della norma è limitato a macchine di misura cartesiane con sistemi tastatori a contatto, salvo diverso accordo tra le parti (costruttore e utilizzatore).

- Caratteristiche metrologiche

Viene definito il Massimo Errore Ammissibile MPE come da estratto della Norma ISO 10360-1.

L'errore d'indicazione per misure di dimensioni E non deve superare il massimo errore ammesso MPE_E stabilito dal costruttore, in caso di verifica di accettazione o dall'utente, in caso di verifica periodica.

Allo stesso modo l'errore di tastatura P non deve superare il massimo errore ammesso MPE_P .

Le condizioni ambientali dovranno essere conformi alle specifiche del costruttore, in caso di verifica di accettazione, ed a quelle dell'utente, in caso di verifica periodica.

Verifica dell'errore di tastatura P

Si utilizza una sfera di diametro compreso tra 10 e 50 mm, tarata per errore di forma. La sfera deve essere differente da quella fornita dal costruttore ed utilizzata per qualificare il tastatore, e sarà posta in una locazione differente da quella abitualmente scelta per la qualifica del tastatore.

L'orientamento dello stilo del tastatore è scelto dall'utente ma si raccomanda di utilizzare direzioni non parallele ad alcun asse coordinato della CMM.

Si effettuano 25 prese-punto, in modo uniforme sulla semisfera, a scelta dell'utente. Si raccomanda la distribuzione di punti illustrata nella Figura 1-7.

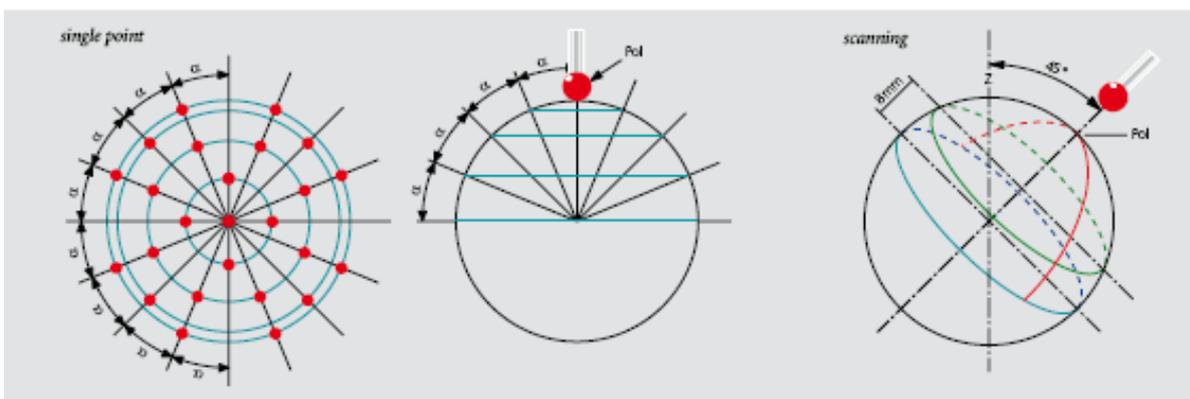


Figura 1-7 - Distribuzione dei punti di tastatura per determinare l'errore di tastatura P e l'errore in scansione.

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 :

$$P = R_{i \max} - R_{i \min}$$

Verifica dell'errore di indicazione per misure di dimensioni E

Si opera utilizzando una serie di campioni di lunghezza, per comparazione dei valori indicati dalla CMM con quelli noti dal certificato di taratura.

I campioni sono di 5 differenti dimensioni e sono misurati in 7 differenti locazioni/orientamenti nel volume della CMM, ripetendo ogni misurazione 3 volte. I valori elaborati per la verifica sono quindi 105.

I campioni sono costituiti da un calibro a passi o da una serie di blocchetti piano-paralleli conformi alla norma ISO 3650, la loro lunghezza minima non deve essere inferiore a 30 mm e la loro lunghezza maggiore non deve essere inferiore al 66% della dimensione della massima diagonale 3D del volume di misura della CMM. Le misurazioni devono essere eseguite per interni o per esterni, approcciando un solo punto su ognuna della superfici qualificate del campione.

Le posizioni dei campioni nel volume della CMM è scelta dall'utilizzatore.

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

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

Sono ammesse correzioni per errori sistematici o per effetti termici solo se la CMM dispone di adeguati strumenti software. In particolare non sono ammesse le correzioni manuali degli effetti termici se la CMM opera nei limiti stabiliti dal costruttore per le condizioni ambientali.

- Conformità alle specifiche

La CMM supera sia la verifica di accettazione che la verifica periodica se entrambe le seguenti condizioni sono verificate:

- ✓ l'errore di indicazione E non supera i limiti specificati dal costruttore MPE_E , tenendo anche conto dell'incertezza associata alle misure, secondo la norma ISO 14253-1;
- ✓ l'errore di tastatura P non supera i limiti specificati dal costruttore MPE_P , tenendo anche conto dell'incertezza associata alle misure, secondo la norma ISO 14253-1.

Un massimo di 5 dei 35 valori di lunghezza misurati può avere uno dei 3 valori ripetuti oltre l'intervallo di conformità. Ciascuna di queste misure sarà ripetuta 10 volte nella stessa posizione / orientazione, e la CMM sarà considerata idonea se nessuna delle 10 ripetizioni fornisce indicazioni oltre i limiti specificati.

Viene di seguito riportato un estratto dalla norma che definisce le possibili espressioni analitiche e grafiche dell'errore massimo ammissibile MPE_E .

NOTA 1. Massimo errore ammissibile di indicazione di una CMM per misurazioni di dimensione MPE_E :

valore estremo dell'errore di indicazione di una CMM per misurazioni di dimensione E , ammesso da specifiche, regolamenti, ecc., per una CMM.

Il massimo errore di indicazione ammissibile di una CMM per misurazioni di dimensione, MPE_E , è espresso in una delle tre forme seguenti:

- $MPE_E = \pm \text{minimo di } (A + UK) \text{ e } B$ oppure
- $MPE_E = \pm (A + L/K)$ oppure
- $MPE_E = \pm B$

come indicato in Figura 1-8, dove:

A è una costante positiva espressa in micrometri, dichiarata dal costruttore;

K è una costante positiva adimensionale dichiarata dal costruttore;

L è la dimensione misurata, in millimetri;

B è il massimo errore ammissibile MPE_E , in micrometri, dichiarato dal costruttore

Le espressioni si applicano per qualsiasi posizione e/o orientazione del campione materiale di dimensione entro il volume di misura della CMM.

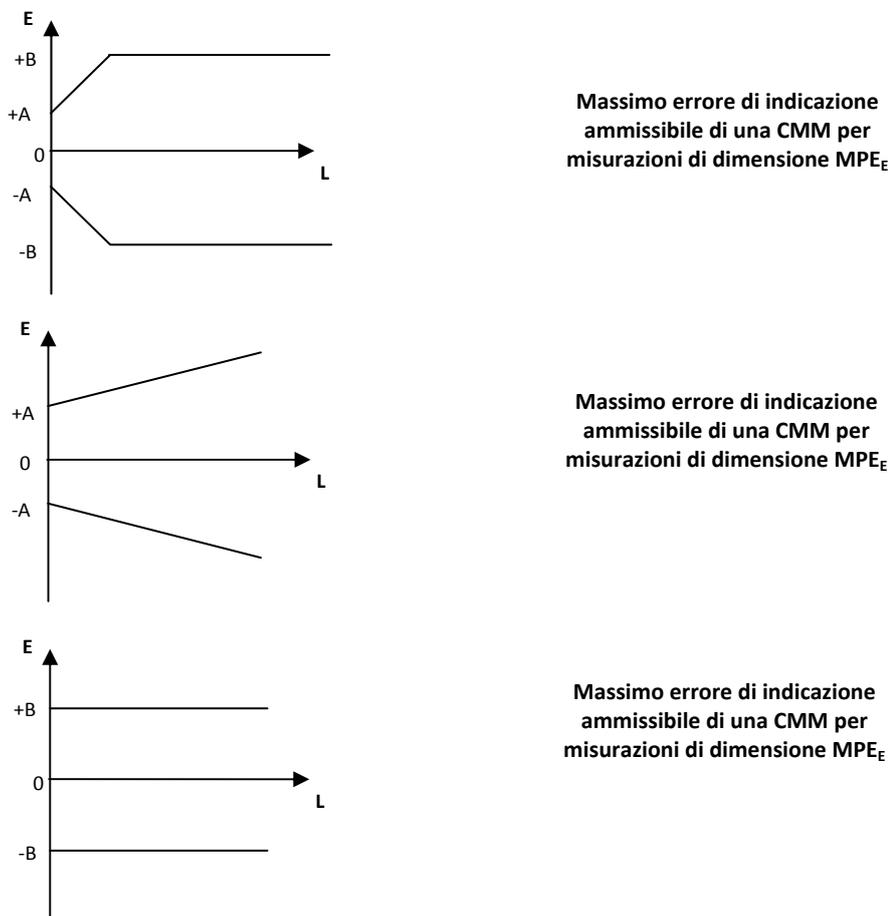


Figura 1-8 - Esempi di rappresentazione del massimo errore di indicazione

Si noti l'importante variante rispetto alla edizione precedente, per cui l'incertezza della misura è da valutarsi di volta in volta, tenendo in considerazione:

- ✓ l'errore di forma della sfera del tastatore
- ✓ l'errore di forma della sfera per la verifica del tastatore
- ✓ l'incertezza della taratura dei campioni di lunghezza
- ✓ l'incertezza dovuta all'errore di allineamento dei campioni di lunghezza

Vengono quindi eliminate le prescrizioni circa i limiti delle incertezze di taratura e di errore di forma:

“I campioni devono avere un'incertezza di taratura (F) inferiore al 20% del massimo errore ammissibile per la misura da parte della CMM del corrispondente campione materiale, definito con il simbolo E. Nel caso in cui i campioni siano forniti dall'utilizzatore ed F sia maggiore del 20% di E, il valore di F dovrà essere sommato al valore di E per ridefinire la specifica di accettazione.”

“Per la prova si utilizza una sfera di diametro compreso tra 10 mm e 50 mm, tarata per errore di forma non superiore a 0,2 volte la specifica R fornita dal costruttore.”

- Verifiche periodiche e intermedie

L'utilizzatore che opera in regime di qualità conforme alle norme della serie ISO 9000 deve sottoporre le apparecchiature per misurazioni a verifiche periodiche e intermedie.

La norma può essere utilizzata per effettuare verifiche periodiche, ma in questo caso i limiti di accettabilità vengono definiti dall'Utente e possono essere differenti da quelli utilizzati nella verifica di accettazione.

La norma può essere utilizzata come traccia per le verifiche intermedie, riducendo il numero dei campioni, delle locazioni, delle ripetizioni.

Per le verifiche intermedie si raccomanda di utilizzare campioni alternativi, quali:

- ✓ particolari rappresentativi degli oggetti di misurazione più spesso utilizzati in pratica,
- ✓ piastre a sfere o a fori,
- ✓ ball-bar,
- ✓ anelli,

e costruiti con materiale simile a quello dei particolari più frequentemente misurati.

1.6.3.6.3 La norma ISO 10360-3:2000 – CMM con tavola rotante

Tale norma riprende i concetti espressi nella corrispondente VDI/VDE 2617, con alcune varianti.

Si prefigge lo scopo di proporre prove di accettazione e riverifica per una CMM con 4 assi, di cui 3 relativi al sistema coordinato macchina ed un quarto costituito dall'asse di una tavola rotante utilizzata per orientare il pezzo.

Sono definiti gli errori di indicazione F_R , F_T , F_A denominati rispettivamente errori radiale, tangenziale e assiale del quarto asse.

Essi sono rispettivamente gli intervalli radiale, tangenziale ed assiale dell'errore di indicazione della posizione del centro di una sfera di prova, misurata dalla CMM, nel sistema di riferimento pezzo, con l'asse della tavola come quarto asse. Tali grandezze sono espresse in micrometri.

Sono definiti i relativi massimi errori ammessi MPE_{FR} , MPE_{FT} , MPE_{FA} definiti dal costruttore in caso di verifica di accettazione e dall'utente in caso di riverifica.

I valori specificati si applicano per qualsiasi condizione di carico, locazione ed orientazione della tavola rotante, e per ogni posizione degli elementi utilizzati nella prova, purché nei limiti specificati. Le condizioni ambientali devono essere conformi alle specifiche del costruttore o a quelle dell'utente e i limiti della configurazione del sistema tastatore entro le specifiche di MPE_E .

La prova consiste nella misurazione della variazione delle coordinate del centro di due sfere di prova montate sulla tavola come da Figura 1-9. Le sfere hanno il valore del diametro tra 10 e 30 mm e sono tarate per il solo errore di forma.

La prima sfera A si trova ad una distanza radiale "r" dal centro tavola e alla minima distanza h_A possibile dal piano tavola. La seconda sfera B si trova alla stessa distanza r dal centro e ad un'altezza h_B sul piano tavola scelta tra quelle proposte in una apposita tabella (ma esiste la libertà di differenti scelte in base ad accordi tra le parti). La differenza tra le due altezze è pari a Δh . Sia r che Δh devono essere specificate dal costruttore.

La posizione del centro delle sfere è determinata rispetto ad un sistema di riferimento in cui sono fissate tre direzioni: radiale, tangenziale e assiale.

La posizione del centro delle sfere è misurata più volte, ciascuna in una differente posizione angolare della tavola.

Le posizioni della tavola sono specificate nella Tabella 1-2, valida quando la CMM copre con il suo volume di misura la totalità del piano di lavoro della tavola rotante. In caso contrario, è proposta una tabella alternativa o si prendono accordi specifici tra costruttore ed utilizzatore.

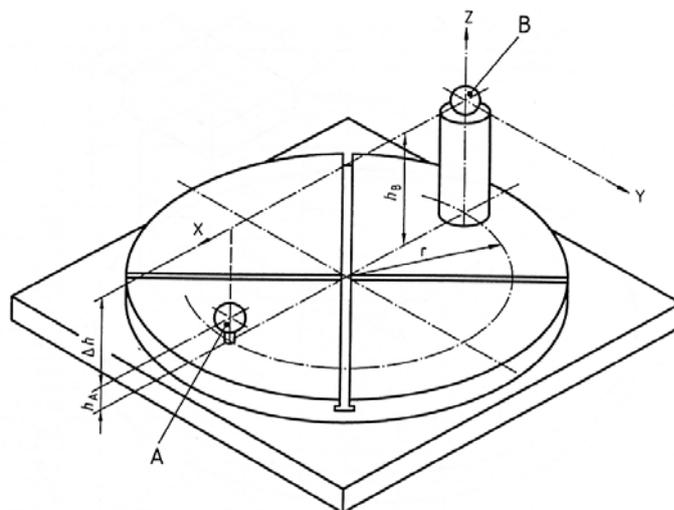


Figura 1-9 - Tavola rotante

In ciascuna delle posizioni indicate si misurano le coordinate del centro delle sfere e al termine della prova si computa per ciascuna sfera il relativo valore di F_R .

La prova ha esito positivo se ciascuno dei 6 valori FR è minore del limite specificato, tenendo in considerazione le incertezze della misura come specificato dalla norma ISO 14253-1.

Come contributi d'incertezza concorrono gli errori di forma dell'elemento tastatore, dello stilo e delle sfere di prova.

posiz. n°	angolo °	sfera A – coordinate del centro			sfera B – coordinate del centro		
		X_A	Y_A	Z_A	X_B	Y_B	Z_B
0	0	x	x	x	x	x	x
1	135	x	x	x			
2	225	x	x	x			
3	315	x	x	x			
4	405	x	x	x			
5	540	x	x	x			
6	630	x	x	x			
7	810	x	x	x			
8	630	x	x	x			
9	540	x	x	x			
10	405	x	x	x			
11	315	x	x	x			
12	225	x	x	x			
13	135	x	x	x			
14	0	x	x	x	x	x	x
15	-135				x	x	x
16	-225				x	x	x
17	-315				x	x	x
18	-405				x	x	x
19	-540				x	x	x
20	-630				x	x	x
21	-810				x	x	x
22	-630				x	x	x
23	-540				x	x	x
24	-405				x	x	x
25	-315				x	x	x
26	-225				x	x	x
27	-135				x	x	x
28	0	x	x	x	x	x	x
		FR_A	FT_A	FA_A	FR_B	FT_B	FA_B

Tabella 1-2 - Posizioni della tavola

1.6.3.6.4 La norma ISO 10360-4 : 2000 – Verifica di CMM utilizzate in scansione

Viene definito un errore di tastatura in scansione, T_{ij} , come intervallo entro cui possono essere determinati i valori dei raggi di una sfera di prova utilizzando un solo stilo, essendo le misure effettuate in scansione.

Viene inoltre definito un massimo errore di tastatura ammissibile, MPE_{Tij} , opportunamente specificato.

La scansione può essere effettuata in base alle combinazioni riportate in Tabella 1-3.

densità di punti	percorso predefinito $j = P$	percorso non predefinito $j = N$
Alta $i = H$	THP	THN
Bassa $i = L$	TLP	TLN

Tabella 1-3 - Densità di scansione

Il percorso di scansione è predefinito quando il moto del sistema tastatore è guidato secondo una linea di scansione “bersaglio”, viceversa se il moto è guidato per retroazione del sistema.

La densità di punti si definisce alta quando la distanza tra ogni due punti di scansione consecutivi è minore o eguale a 1 mm, viceversa se maggiore o eguale a 1 mm.

Viene ancora definita una “durata della prova di scansione, τ ”, come il tempo trascorso dall’inizio al termine della prova, con una relativa “massima durata ammissibile, MPT”. Le scansioni devono iniziare e terminare con lo stilo posizionato ad un punto intermedio distante almeno 10 mm dalla sfera di prova che viene approcciata lungo una superficie normale ad una determinata velocità di traslazione.

L’elemento di prova è una sfera in acciaio e caratterizzata da:

- misura del diametro = 25 mm
- rugosità superficiale $Ra \leq 0,05 \mu m$
- durezza $\geq 800 HV$

e tarata per misura del diametro ed errore di forma.

La sfera deve essere differente da quella fornita dal costruttore ed utilizzata per qualificare il tastatore, e sarà posta in una locazione diversa da quella abitualmente scelta per la qualifica del tastatore.

Il sistema tastatore deve avere un elemento tastatore sferico con misura del diametro di 3 mm, ed il suo orientamento deve essere tale che durante la scansione siano atti contemporaneamente tutti e tre gli assi della CMM. Si suggerisce quindi una inclinazione di 45° rispetto all’asse della colonna verticale della CMM.

Si esegue una serie di 4 scansioni su linee ottenute da intersezione di una sfera con 4 piani (vedesi Figura 1-10) :

- ✓ un piano equatoriale (piano A) ;
- ✓ un piano parallelo al precedente ad una distanza di 8 mm (piano B) ;
- ✓ un piano ortogonale al precedente e passante per il polo (piano C) ;

- ✓ un piano ortogonale a tutti i precedenti, a 8 mm dall'asse della sfera (piano D)

e si determinano il centro dell'elemento associato sostitutivo (una sfera calcolata con il metodo dei minimi quadrati), ed il tempo impiegato per la scansione.

Si ricalcolano le distanze radiali di tutti i punti scansionati da tale centro, verificando che l'intervallo definito dalla differenza tra il valore massimo e il valore minimo sia minore del massimo errore di taratura ammissibile.

$$T_{ij} = R_{\max} - R_{\min} < MPE_{Tij}$$

Si calcola quindi il valore assoluto della differenza tra la misura di ciascuno dei raggi precedentemente definiti ed il valore nominale del raggio della sfera, dedotto dal certificato di taratura., verificando che :

$$\text{MAX}(\text{ASS}(R - R_n)) < MPE_{Tij}$$

Si verifica infine che il tempo impiegato sia minore del valore massimo specificato.

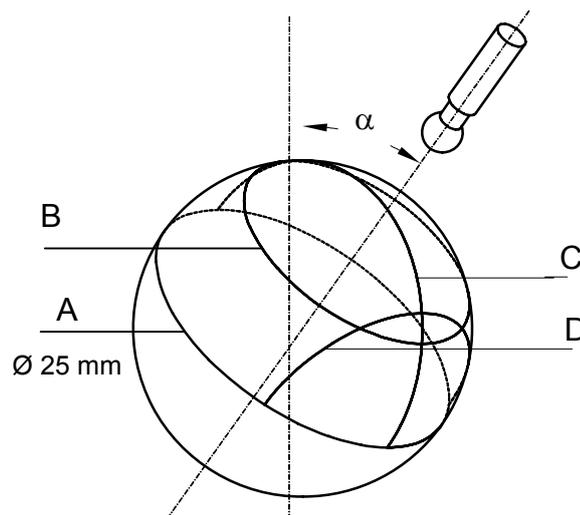


Figura 1-10 - Schema delle traiettorie da scansire

Nelle verifiche si dovrà tenere conto dell'incertezza associata alle misure. I contributi principali sono:

- ✓ l'errore di forma della sfera dello stilo
- ✓ l'errore di forma della sfera di prova
- ✓ l'incertezza di taratura del diametro della sfera di prova

Si noti che la prova non evidenzia tutti gli errori di scansione introdotti dalla risposta dinamica della CMM, che dipendono essenzialmente dalla forma del pezzo reale (discontinuità, spigoli) e dallo stato della sua superficie (rugosità, coefficiente d'attrito), per cui si suggeriscono eventuali prove supplementari.

Buona norma è confrontare i risultati ottenuti dalla scansione con quelli determinati per mezzo di una misurazione tradizionale, per punti discreti, dello stesso particolare.

1.6.3.6.5 La norma ISO 10360-5:2000 - modalità punto - punto per tastatori multipli

La norma non si applica ai tastatori per misurazioni senza contatto e solo a operazioni di tastatura per punti discreti.

Sono definiti i seguenti errori del sistema tastatore e i relativi massimi errori ammissibili (stabiliti dal costruttore in caso di verifica di accettazione o dall'utente in caso di verifica periodica):

M_F - errore di forma del sistema tastatore a stili multipli fissi
errore di indicazione all'interno del quale può essere determinato l'intervallo dei raggi con un'approssimazione ai minimi quadrati dei punti misurati su un campione materiale di dimensione sferico.

M_S - errore di dimensione del sistema tastatore a stili multipli fissi
errore di indicazione all'interno del quale può essere determinato il diametro di un campione materiale di dimensione sferico, con un'approssimazione ai minimi quadrati di punti.

M_L - errore di posizione del sistema tastatore a stili multipli fissi
errore di indicazione all'interno del quale può essere determinato l'intervallo delle coordinate del centro di un campione materiale di dimensione sferico, con un'approssimazione ai minimi quadrati di punti.

Sono di conseguenza definiti i valori estremi di tali errori di indicazione, MPE_{MF} , MPE_{MS} e MPE_{ML} . Gli stessi parametri sono definiti per un tastatore articolato, quindi A_F , A_S e A_L ed i corrispondenti MPE.

Per la prova del tastatore a stili multipli fissi si utilizzano 5 stili delle stesse dimensioni e caratteristiche. È comunque consentita una variazione di lunghezza tra questi, al massimo di 6 mm o del 10% della lunghezza nominale. Gli stili vengono configurati in una stella, paralleli agli assi coordinati della CMM, e ortogonali uno rispetto all'altro. Con ciascuno di questi stili viene misurata la forma, locazione e dimensione di una sfera approssiata per 25 punti. Tale sfera deve avere una misura del diametro compresa tra 10 e 30 mm e deve essere tarata per dimensione e forma. Se la macchina dispone di un sistema cambio tastatore devono essere effettuati 5 operazioni di cambio, prima di utilizzare ciascuno dei 5 stili.

Si calcola l'intervallo delle coordinate X, Y, Z dei centri delle 5 sfere misurate e il massimo di tali intervalli fornisce il valore di M_L . Si calcola un elemento sostitutivo (ai minimi quadrati) della sfera misurata per tutti i 125 punti e ne risultano l'errore di forma M_F e di dimensione M_S .

La prova è ripetuta nelle stesse condizioni, per ciascuna delle seguenti lunghezze di stili, purché consentite dalle specifiche del costruttore : L = 10 – 20 – 30 - 50 – 100 - 200 – 400 mm.

Per il tastatore articolato si procede nello stesso modo, utilizzando successivamente 5 posizioni angolari, una verticale e quattro orizzontali a 90° (con eventuali cambi dello stilo o della sonda prima di ogni set di misurazioni).

La prova viene ripetuta nelle stesse modalità, utilizzando 4 differenti estensioni della sonda, purché consentite dal costruttore : 0 – 100 – 200 – 300 mm. Lo stilo invece è fisso, di lunghezza pari a 20 mm.

La prova è superata se per ciascuna configurazione di stili o di estensioni sonda gli errori del sistema tastatore (M_F , M_S e M_L oppure A_F , A_S e A_L) sono minori dei corrispondenti MPE.

Nella tabella è rappresentata una matrice degli argomenti trattati nelle norme descritte sopra e attualmente in vigore.

Argomento Norma	Termini, generalità e metodologie metrologiche	verifica prestazioni lunghezza	verifica prestazioni forma e/o scansione	verifica sistema tastatore standard e speciale	verifica CMM con tavola rotante	CMM di grandi dimensioni	verifica periodica e saltuaria	effetti termici	software
ISO 10360-1:2000	X								
ISO 10360-2:2001		X	X	X			X		
ISO 10360-3:2000					X				
ISO 10360-4:2000			X						
ISO 10360-5:2000				X					
ISO 10360-6:2001									X
ISO/IS 10360-7:2008		X Sist vis.	X Sist vis.				X Sist vis.		
VDI 2617-1:1986	X								
VDI 2617-2.1:2001		X				X	X		
VDI 2617-2.2:2000			X				X		
VDI 2617-2.3:2001		X				X	X		
VDI 2617-3:1989	X								
VDI 2617-4:1989					X				
VDI 2617-5:2001 VDI 2617-5.1:2000							X		

Argomento Norma	Termini, generalità e metodologie metrologiche	verifica prestazioni lunghezza	verifica prestazioni forma e/o scansione	verifica sistema tastatore standard e speciale	verifica CMM con tavola rotante	CMM di grandi dimensioni	verifica periodica e saltuaria	effetti termici	software
VDI 2617-6:1997	X ottici		X ottici	X ottici					
VDI 2617-6.1:1998			X ottici	X ottici					
VDI 2617-6.2:1999			X ottici	X ottici					
VDI 2617-7:2001	X								
VDI 2617-8:2006	X							X	
VDI 2617-9:2009		X braccio					X braccio		
VDI 2634-2:2002		X Sist vis.	X Sist vis.				X Sist vis.		
ASME B89:1990	X	X		X	X	X	X	X	
ASME B89.4.10360:2008		X braccio	X Braccio						
ASME B89.4.10:2000									X Braccio
ASME B89.4.19:2006		X Braccio	X braccio				X Braccio		
ASME B89.4.22:2004		X braccio	X braccio				X braccio		

Tabella 1-4 - Argomenti trattati dalle norme

Di seguito, a titolo riassuntivo e per completezza, si riporta un elenco delle norme attualmente esistenti a livello nazionale ed internazionale, che costituiscono il presente riferimento per la verifica delle prestazioni di sistemi di misura tridimensionali.

Documenti e norme internazionali di interesse metrologico internazionale:

- Il VIM, Vocabolario terminologico di riferimento
- La GUM, Guida all'espressione dell'incertezza di misura
- La ISO 14660-1:1999 "Geometrical product specifications (GPS) - Geometrical features -- Part 1: General terms and definitions", che stabilisce i termini di riferimento per definire gli elementi geometrici nell'ambito delle specifiche geometriche di prodotto
- La UNI ISO 14253-1:2001, "verifica mediante misurazione dei pezzi e delle apparecchiature per misurazioni", che definisce le regole per stabilire la conformità o la non conformità rispetto alle specifiche, tenendo conto dell'incertezza di misura. La norma fornisce
 - la definizione di specifica tecnica per le apparecchiature di misurazione (in generale espressa come limite di errore massimo ammesso)
 - il criterio per provare la conformità o la non conformità rispetto a tale specifica tecnica
 - le regole da adottare quando, prendendo in considerazione l'incertezza dei risultati delle misurazioni effettuate per l'esecuzione delle prove, non possa essere formulata una decisione certa.

Quanto stabilito da questa norma ha una valenza di natura tecnica ma anche giuridico-contrattuale. Infatti essa stabilisce che l'onere della prova di conformità è del costruttore/fornitore, mentre quello della prova di non conformità è dell'acquirente/utilizzatore. Inoltre viene proposta una regola decisionale la cui applicazione elimina ogni ambiguità legata all'incertezza associata ai risultati delle prove.

Norme sulle macchine a coordinate:

- Serie ISO 10360
- La guida tedesca VDI/VDE 2617
- Serie **ISO/TS 15530-3:2003**, "*Geometrical Product Specification (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for evaluation of the uncertainty of measurement – Part 3: Use of calibrated workpieces or standards*". Al momento è pubblicata solo la parte 3, che definisce i metodi per il calcolo dell'incertezza delle misure eseguite con macchina di misura a coordinate.
- La guida americana ANSI/ASME B89.4.1 sui metodi per la verifica di prestazioni delle CMM. **ASME B89.4.10360.2-2008**, "*Acceptance Test and Reverification Test for Coordinate Measuring Machines (CMMs) – Part 2: CMMs Used for Measuring Linear Dimensions*". È la tanto attesa sostituzione della ASME B89.4.1. Questo documento contiene la revisione della norma ISO 10360-2 e uniforma la linea di verifica delle prestazioni delle macchine di misura a coordinate americana con gli standard ISO. Il documento B89.4.10360.2 comprende non solo la nuova norma ISO 10360-2, ma anche parti della norma ISO 10360-1 necessari per creare la scheda tecnica del CMM e le informazioni contenute nella norma ISO 23165 "*Guidelines for Coordinate Measuring Machine Test Uncertainty*" necessarie per stimare l'incertezza. Quindi la B89.4.10360.2 contiene tutte le informazioni necessarie per effettuare i controlli CMM in un unico documento. La parte 2 tratta le prestazioni della macchina di

misura, mentre di prossima uscita ci sono le parti della norma che trattano nel dettaglio tali prestazioni, ad esempio la prova per valutare l'errore di tastatura.

- La guida americana ANSI/ASME B89.4.10 per la verifica del sw di misura **ASME B89.4.10-2000**, "*Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring System Software*" fornisce le specifiche per testare gli algoritmi basati sui minimi quadrati del software di misura della CMM.

1.6.3.7 Confronto tra ISO 10360 e B89

Fin dall'inizio esistevano alcune divergenze tra Europei ed Americani sull'impostazione di base che tutt'oggi non sono ancora state risolte a livello di confronto tra la norma B89 e la ISO 10360.

Gli europei, infatti, si sono posti fin dall'inizio il problema della riferibilità delle misure ed hanno scelto di utilizzare come elementi di riferimento i blocchetti piano paralleli, mentre gli americani utilizzano artefatti non calibrati, costituiti da barre con due sfere alle estremità.

Inoltre gli americani si sono preoccupati di standardizzare la valutazione dell'influenza della temperatura ambientale.

Il comitato ISO è rappresentato da 16 nazioni e costituito da rappresentanti di istituti metrologici nazionali, di istituzioni accademiche, di costruttori di CMM e di utilizzatori di CMM.

Questa composizione eterogenea introduce il problema della differenza tra le varie culture, lingue e punti di vista, che ha come conseguenza l'emissione della norma in tempi lunghi.

Per esempio non si trova un accordo sui campioni di riferimento da utilizzare: secondo alcuni sono da preferirsi i blocchetti piano paralleli, i quali, secondo altri, creerebbero problemi per il parallelismo delle superfici di riferimento sulle dimensioni maggiori.

I principali punti di contrasto tra la ISO e la B89 sono riassunti nella Tabella 1-5.

B89	ISO 10360
<i>PUNTI RILEVANTI</i>	
Valutazione per mezzo di un solo numero che esprime la dispersione delle misure di un artefatto non calibrato di lunghezza la maggiore possibile, misurato in posizioni diverse nel volume della macchina	Valutazione per mezzo di una formula binomia con un termine indicativo degli errori casuali e di quelli sistematici in funzione della lunghezza, con pretesa di validità statistica e di possibilità di prevedere i risultati forniti dalla macchina
Possibilità di individuare i principali errori di geometria	La condizione ambientale deve essere idonea: le misure sono riferite ai 20°C per mezzo di correzione lineare dei valori misurati
Valutazione dell'effetto della temperatura per mezzo di una prova sperimentale che fornisce un coefficiente in base al quale si degrada la prestazione dichiarata dal costruttore della macchina.	
Nessuna valutazione di tipo statistico	
<i>PRO</i>	
Ottima norma per le valutazioni della riproducibilità nel volume e della sensibilità alle variazioni ambientali	Tale serie di norme è in grado di evidenziare gli errori di misura di lunghezza, compresi gli effetti dinamici e le anisotropie
<i>CONTRO</i>	
Viene posto l'accento sulla valutazione degli errori sistematici in particolare quelli funzione della lunghezza misurata	In alcuni casi l'applicazione è complessa e i risultati di interpretazione non banal
È una procedura poco utile per la determinazione della non linearità dei sistemi di trasduzione e delle anisotropie dinamiche	Gli errori sistematici sulle lunghezze massime sono evidenziati in maniera migliore dalla procedura americana
Sono state effettuate correzioni all'impostazione iniziale, ma il mercato degli utilizzatori di CMM ha recepito la prima versione della norma e pone alcune resistenze al cambiamento.	Non c'è alcuna possibilità di individuare errori di geometria prevalenti se non quelli di quadratura

Tabella 1-5 - Confronto tra la norma B89 e la ISO 10360

1.7 I bracci articolati di misura

1.7.1 Introduzione

Negli ultimi anni si sta assistendo ad un notevole incremento della diffusione di una particolare tipologia di macchine di misura a coordinate: si tratta delle macchine di misura articolate, conosciute anche con il termine bracci articolati di misura o bracci di misura antropomorfi o ancora con l'acronimo anglosassone AACMM, ossia Articulated Arm Coordinate Measuring Machines.

Esse sono macchine di misura a coordinate tipicamente a comando manuale che, a differenza delle tradizionali macchine di misura a coordinate cartesiane, raccolgono punti del volume di misura attraverso una serie di assi rotanti.

Sono tipicamente costituiti da tre aste collegate tra loro alle estremità da giunti che consentono movimenti rotatori, che danno origine a cinque, sei o sette gradi libertà. Anche in questa tipologia di strumenti vi è una testa di misura con un sensore tattile o ottico, alloggiato sull'estremità libera del braccio. In questo caso però la misurazione digitale avviene tramite degli encoder, uno per ogni grado di libertà, che registrano la rotazione degli snodi del braccio e consentono di ricavare la posizione del tastatore.



Figura 1-11 - Braccio di misura articolato con particolari delle sonde

1.7.2 Generalità e principio di funzionamento

Costruttivamente le macchine sono costituite da segmenti tubolari, normalmente in fibra di carbonio o alluminio, accoppiati tra loro per mezzo di giunti rotanti con due gradi di libertà ciascuno.

I gradi di libertà del braccio sono indicati nella Figura 1-12.

Un ulteriore giunto è posto all'estremità inferiore del primo segmento e lo collega alla base d'appoggio, mentre all'estremità del secondo segmento è presente un terzo giunto che permette il montaggio del sistema tastatore. Nel caso di utilizzo di particolari sensori di misura non a contatto, ad esempio a lama di laser, alcuni costruttori propongono un settimo asse rotante che permette di ruotare il sensore attorno al proprio asse, garantendo una migliore manovrabilità del sistema in presenza di pezzi di morfologia complessa.

Ogni giunto è dotato di due encoder angolari. L'insieme delle posizioni angolari di tutti gli encoder, associato alle relative lunghezze dei segmenti, permette il calcolo della posizione in coordinate X, Y e Z della punta dell'elemento di contatto, che descrive un volume di misura di forma sferica.

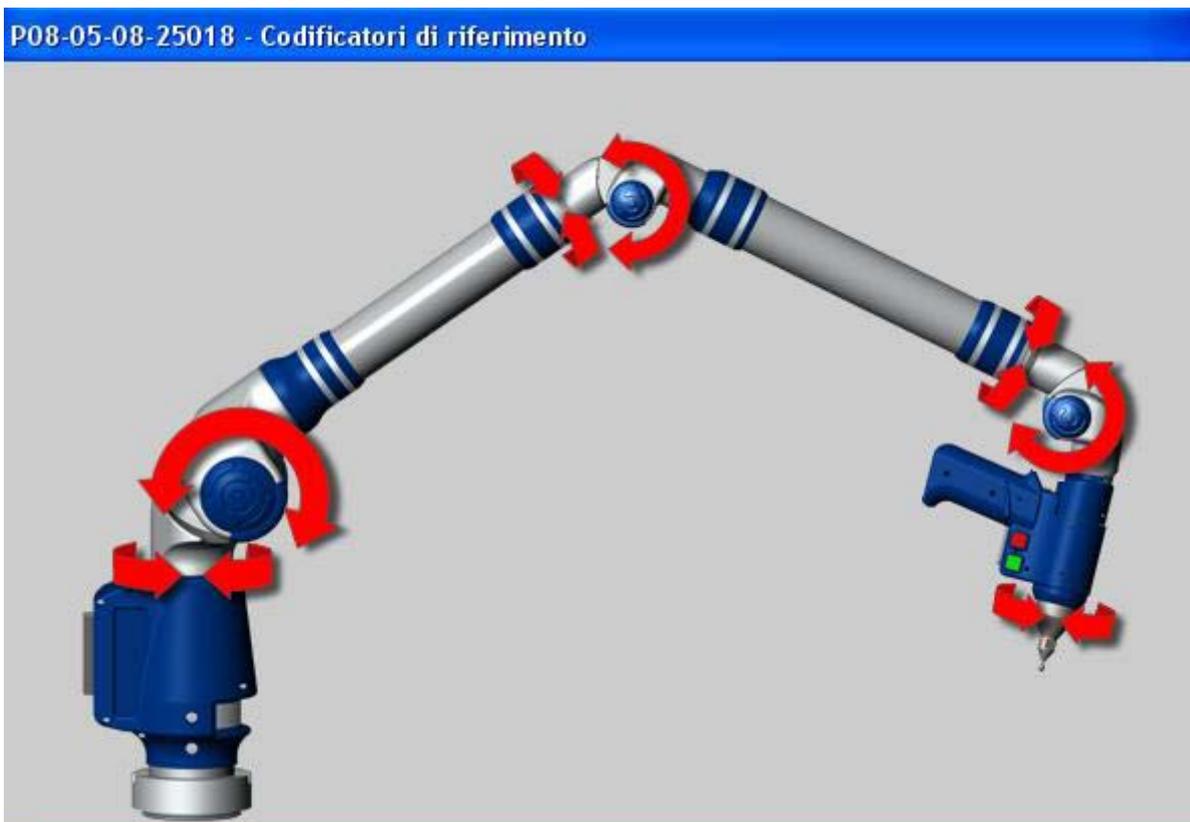


Figura 1-12 - Gradi di libertà di un braccio articolato di misura

Grazie a tale architettura si costruiscono macchine che possono essere dotate di un numero di gradi di libertà generalmente variabili da cinque a sette.

Le macchine sono catalogate in base alla dimensione del volume di misura e al numero di gradi di libertà. Esse possono essere dotate di sistema tastatore a contatto di tipo passivo o trigger, oppure di sensori non a contatto tipo laser scanner o altro.

Per raggiungere le prestazioni desiderate anche queste macchine necessitano della compensazione geometrica degli errori, che generalmente non è effettuata tramite il rilevamento dei singoli parametri cinematici, ma in modo volumetrico, elaborando il risultato di misura di un campione di lunghezza collocato in diverse posizioni nel volume di misura.

1.7.3 Vantaggi e svantaggi di utilizzo

I bracci di misura articolati di misura presentano numerosi vantaggi legati alla loro grande versatilità di impiego. Un aspetto che li rende particolarmente versatili è la portabilità, ovvero la possibilità di portare la macchina in prossimità o addirittura sul pezzo da misurare, anziché il contrario, come avviene con le macchine di misura cartesiane. Tali strumenti, infatti, possono essere posizionati a pavimento per mezzo di cavalletti o su piani di riscontro per mezzo di piastre con basi magnetiche, o con apposite piastre forate. La base inoltre può essere posizionata su superfici comunque orientate, sia verticali che orizzontali, anche capovolte.

La possibilità di portare la macchina di misura al pezzo costituisce un grande vantaggio per la misurazione di componenti di grandi dimensioni, direttamente sulle macchine utensili o nel luogo di funzionamento, senza la necessità di dover smontare il componente.

Trattandosi di macchine manuali, solitamente dotate di software semplici ed intuitivi e non necessitando di programmazione, ne permettono l'utilizzo in modo rapido anche a personale non altamente qualificato, anche se va sottolineato che, dal punto di vista strettamente metrologico, l'esperienza e la sensibilità dell'operatore possono essere significativamente influenti.

I software applicativi sono stati sviluppati per adattarsi alla particolare architettura dei bracci di misura articolati e a risolvere i problemi applicativi che tale architettura ha generato.

Un altro vantaggio di questi strumenti è dato dalla possibilità di misurare il componente senza dover fare più piazzamenti o creare diverse configurazioni di tastatore, evitando così di introdurre un errore legato al riposizionamento e riallineamento del componente.

Le accuratèzze di misura ottenibili da questi sistemi sono generalmente inferiori a quelle ottenibili con le CMM cartesiane, ma certamente sufficienti a soddisfare le esigenze delle applicazioni cui tipicamente si rivolge questa tipologia di strumenti.

Pertanto la versatilità e in particolare la portabilità dei bracci di misura articolati rende idoneo l'utilizzo di tali strumenti anche in settori dove le CMM cartesiane non sono diffuse.

Infatti, oltre ai settori classici, quali meccanico, automotive ed aerospaziale, essi si stanno diffondendo nell'ambito della cantieristica navale, dell'edilizia, dell'industria ferroviaria, dei trasporti e movimento terra e del recupero dei beni artistici ed architettonici.

Numerosi accessori permettono di ampliare le possibilità applicative: oltre ad una vasta gamma di sistemi tastatori che vanno dai semplici trigger, agli scanner laser e alle forcelle per la misurazione di elementi tubolari, ma anche guide lineari per rapidi spostamenti della macchina, sistemi hardware e software per la generazione di sistemi di riferimento su pezzi di grandi dimensioni che permettono la ripresa delle misurazioni dopo lo spostamento del braccio, trasmissione dati senza fili (tecnologia Bluetooth) verso il calcolatore per una migliore manovrabilità e accessibilità ai pezzi di grandi dimensioni.

Il braccio articolato con tastatore permette l'acquisizione di punti su superfici a forma libera, difficilmente accessibili con l'uso della CMM e come tutte le macchine a misura di coordinate, è interfacciabile con i software CAD/CAM più comuni, tuttavia ha lo svantaggio di non essere automatizzabile, penalizzando sia la ripetibilità di misura che assume valori di $0,011 \div 0,055$ mm, che la sensibilità in funzione della lunghezza dei bracci.

Le CMM vengono, infatti, programmate a seguire delle traiettorie prestabilite sulla superficie da analizzare attraverso sistemi a controllo numerico. Ciò permette di ottenere sia un'elevata ripetibilità di misura che si attesta su valori di $3 \mu\text{m}$ pressoché costante al variare della dimensione della macchina, che un'ottima accuratezza di acquisizione.

1.7.4 Ambiente di lavoro

Come già sottolineato, le macchine di misura a coordinate vengono solitamente utilizzate in ambito industriale per il controllo delle variazioni di processo, per valutare i fuori tolleranza dei componenti produttivi e per operazioni di ispezione in generale. Per poter svolgere tali funzioni talvolta è necessario trasportare la misurazione e l'operazione di ispezione il più vicino possibile al processo di fabbricazione.

Tradizionalmente l'uso della metrologia a coordinate per il controllo di processo richiedeva, normalmente, che fossero effettuate misurazioni di routine off line da operatori specializzati. Operando in questo modo le operazioni di correzione del processo produttivo venivano spesso effettuate non tempestivamente e dopo che i componenti erano stati rilavorati per soddisfare le specifiche.

Con lo sviluppo dei bracci di misura articolati si è potuto migliorare i tempi di misurazione e l'analisi dei dati ricavati dalle operazioni di ispezione. Infatti proprio per la portabilità del braccio di misura, esso può essere inserito nella catena produttiva del processo ed effettuare le verifiche intermedie del prodotto in real time, ovvero senza la necessità di interrompere la produzione e spostare il componente dalla macchina di lavorazione.

È altresì chiaro che, facendo lavorare una macchina di misura in ambiente diverso da quello controllato, il processo di misurazione, che fa corrispondere ad ogni punto registrato delle coordinate tridimensionali, contiene molte fonti di incertezza aggiuntive. Infatti, accanto alle distorsioni geometriche della struttura della macchina e all'effetto sistematico della sonda, alcuni dei più grandi contributi di incertezza di cui è necessario tener conto sono gli effetti termici e meccanici dell'ambiente di funzionamento.

L'uso delle CMM in ambiente industriale richiede dunque di verificare attentamente se le situazioni ambientali sono compatibili con quelle previste dal costruttore della macchina di misura stessa, allo scopo di garantire le sue caratteristiche metrologiche. A causa dell'incremento dell'uso e dell'importanza dei bracci di misura articolati, si vede necessario sviluppare test affidabili ed accurati per la verifica delle loro prestazioni, allo scopo di assicurare la qualità dei componenti realizzati.

L'implementazione di procedure che consentano di assicurare la qualità della misura viene però spesso lasciata all'iniziativa dell'utente che, solitamente, non ha la possibilità di far fronte da solo alla complessità del problema.

Un'altra condizione ambientale che influenza uno strumento di misura è l'eventuale energia radiante presente nell'ambiente, ovvero la presenza di finestre, lampade, termosifoni. Le

CMM si devono trovare il più possibile lontano dalle fonti di energia o comunque è necessario isolare il volume di lavoro della macchina.

Infine un'altra condizione ambientale di natura termica che influenza il comportamento dello strumento e che caratterizza lo stato dell'aria del suo volume di lavoro è l'umidità relativa. Per mantenerla sotto controllo e ottenere misurazioni accurate si dovrebbe garantire una variazione inferiore a quella massima ammessa.

Degli altri parametri termici, in genere non specificati dal costruttore ma che intervengono significativamente nel corretto funzionamento del braccio, sono la portata e la velocità dell'aria nell'ambiente di lavoro. Tali parametri sono difficili da valutare ma sono determinanti per il componenti più piccoli dello strumento, i quali hanno ridotta capacità termica e tendono a seguire rapidamente le variazioni di temperatura indotte da tali parametri.

1.7.5 Norme sui bracci di misura articolati

Trattandosi di macchine di misura a coordinate a tutti gli effetti, la verifica delle prestazioni si può effettuare utilizzando la norma ISO 10360-2 già descritta nel § 1.6.3.6.2, tuttavia alcune considerazioni di carattere sia tecnico che formale ne limitano l'utilizzo.

Infatti, ripercorrendo la storia della ISO 10360-2 si può osservare che nella prima versione del 1994 essa forniva la seguente definizione di CMM: "Dispositivo di misura , il cui basamento è in una collocazione fissa durante l'uso, progettato per effettuare misurazioni a partire da almeno tre spostamenti lineari o angolari generati dalla CMM. Almeno uno dei tre spostamenti deve essere lineare." Con quest'ultima frase si rendeva tale norma non applicabile ai bracci di misura articolati.

Nel 2000 la pubblicazione della ISO 10360-1 "Vocabolario" e la successiva eliminazione delle definizioni dalla parte 2 portarono ad una variazione della definizione di CMM e quindi dell'applicabilità della ISO 10360-2. Tale definizione è: "Macchina di misura a coordinate CMM: sistema di misurazione in grado di spostare un sistema tastatore e di determinare coordinate spaziali sulla superficie di un pezzo."

Questa definizione decisamente più generica non prende in considerazione aspetti costruttivi o di architettura delle CMM, quindi la ISO 10360-2:2000 risulta essere formalmente applicabile ai bracci di misura articolati.

La nuova versione della ISO 10360-2:2009 è stata recentemente pubblicata e, sebbene non cambi la definizione di CMM data nella versione precedente, una nota al punto 1 "Scopo" dichiara la non esplicita applicabilità della norma alle macchine non cartesiane, salvo diverso accordo tra le parti: "*This standard does not explicitly apply to non-Cartesian CMMs, however, the parties may apply this part for ISO 10360 to non-Cartesian CMMs by mutual agreement.*"

Dal punto di vista esclusivamente tecnico occorre considerare che, a differenza delle macchine di misura a coordinate, dove un singolo punto è univocamente determinato dalla posizione dei tre assi coordinati, in un braccio di misura un singolo punto può essere determinato attraverso un numero infinito di posizione delle articolazioni.

Ci si pone quindi il problema di quanto le prove previste dalla ISO 10360-2 , ed espressamente ideate per CMM cartesiane, siano significative per la valutazione di macchine con un architettura differente come sono i bracci di misura articolati. A tal scopo nel WG10 SIO è iniziata un'attività per la stesura di una nuova parte della ISO 10360 e specifica per questa tipologia di macchine.

Tuttavia il lavoro è in fase ancora preliminare e la pubblicazione di una norma che regoli il settore dei bracci di misura a coordinate a livello internazionale è prevista solo nel lungo periodo.

Per il momento, in attesa dello sviluppo di norme riconosciute a livello internazionale ci si deve limitare alle linee guida nazionali che regolano la verifica delle prestazioni dei bracci di misura, sottostando in ogni caso alle regole più generali definite in ambito ISO per i sistemi di misura in genere.

Le norme per la valutazione delle prestazioni dei bracci di misura disponibili sul mercato sono le seguenti:

- La guida americana ANSI/ASME B89.4.22-2004, "*Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines* "
- La guida tedesca VDI/VDE 2617-9 (ancora in lingua tedesca) "*Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrößen und deren Prüfung Annahme- und Bestätigungsprüfung von Gelenkarm-Koordinatenmessgeräten*" (in italiano "Prove di accettazione e riverifica per macchine di misura a braccio articolato").

1.7.5.1 La norma ASME B89.4.22-2004

È una norma a tutti gli effetti e applicabile alle sole macchine manuali con un massimo di 7 gradi di libertà e dotate di sistema di tastatore a contatto.

Essa prevede l'esecuzione di tre differenti prove:

1. prova del diametro effettivo
2. prova della prestazione su singolo punto (SPAT)
3. prova della prestazione volumetrica.

La prova del diametro effettivo permette la valutazione della capacità della macchina di misurare un diametro con minime articolazioni del braccio. Si effettua misurando tre volte la sfera di riferimento, di diametro nominale compreso tra 10 e 50 mm con rotondità non superiore a 1/5 della prestazione da verificare, posta in una posizione a circa ½ del raggio della macchina e valutando il massimo scostamento del diametro, rispetto al valore di taratura.

La sfera deve essere misurata tre volte per 9 punti, 4 a 90° tra loro sull'equatore, 4 in una sezione a circa 45° tra polo ed equatore e ruotati di 45° rispetto a quelli sull'equatore, 1 sul polo.

La prova della prestazione su singolo punto (SPAT - Single point articulation performance test) permette la valutazione delle capacità della macchina di riprodurre coordinate di un punto fisso nello spazio sfruttando il più possibile le possibilità di articolazione del braccio.

La prova richiede l'utilizzo di una sfera di riferimento in caso di presenza di sistema tastatore trigger, mentre, con un sistema tastatore passivo occorre disporre di una sede fissa che può essere conica, con foro smussato o con tre sfere, nella quale posizionare l'elemento di contatto.

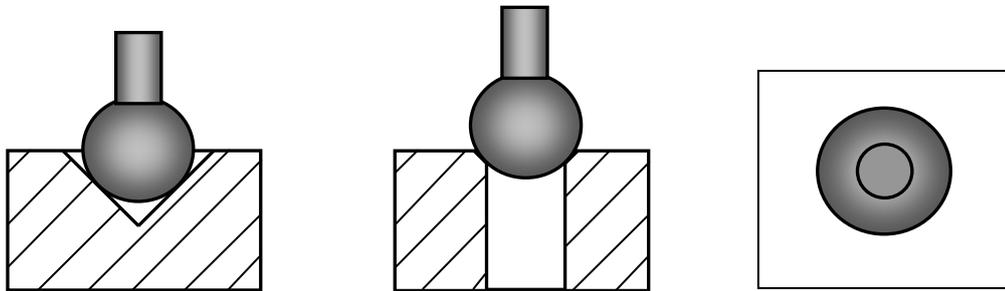


Figura 1-13 - Sedi per la prova S.P.A.T.

Le misurazioni si effettuano in tre differenti posizioni del volume di lavoro, in particolare tra 0% e 20%, 20% e 80%, 80% e 100% della lunghezza del braccio (Figura 1-14), in ciascuna delle quali il centro della sfera o la posizione dell'elemento di contatto viene misurata dieci volte con posizioni differenti ed estreme delle articolazioni (5 con il gomito in posizioni estreme e altre 5 simili, ma con il polso ruotato di 180°).

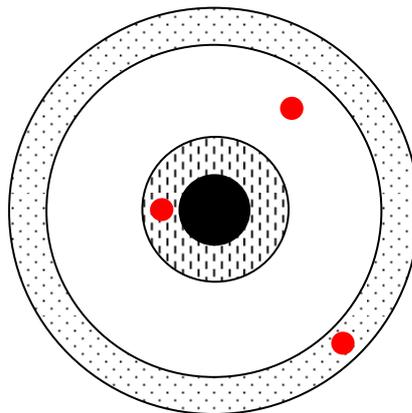


Figura 1-14 - Posizioni della sede nel volume di lavoro del braccio per la prova S.P.A.T secondo la Norma B89

Dei dieci centri delle sfere ai minimi quadrati così individuati si calcola il centro medio e le relative distanze tridimensionali rispetto ad esso.

Per ogni posizione si valuta il massimo scostamento e il parametro $2S_{SPAT}$ calcolato dalla seguente formula:

$$2S_{SPAT} = 2\sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{(n-1)}}$$

dove δ rappresenta ciascuna distanza tridimensionale e n il numero di sfere misurate, che è pari a 10. Tale parametro è indicativo del raggio della regione nella quale hanno probabilità di trovarsi i punti/centri.

La prova della prestazione volumetrica si utilizza per la valutazione della capacità di misurare lunghezze nel volume di lavoro della macchina. Per l'esecuzione di tale prova è richiesto l'utilizzo di calibri di lunghezza tarati, come ad esempio barre a 2 sfere (scelta consigliata), calibri a passi o blocchetti piano paralleli, di due differenti lunghezze nominali proporzionali al diametro del volume della macchina di misura da verificare.

La norma prescrive la misurazione dei campioni una sola volta in venti differenti posizioni, definite come combinazioni di lunghezza del campione, orientamento, direzione, inclinazione, distanza dal centro del volume, ecc.

Sono richieste due differenti lunghezze:

1. tra il 50% ed il 75% del raggio della macchina,
2. tra il 120% ed il 150% del raggio della macchina.

Il volume della macchina viene diviso in 8 parti: 4 "spicchi" superiori e 4 "spicchi" inferiori, numerati da 1 a 8.

È necessaria la definizione da parte del costruttore del "fronte" della macchina poiché le posizioni fanno riferimento a tale convenzione.

Sono definite tre differenti inclinazioni dei campioni: orizzontale, verticale ed inclinata a 45° e due differenti orientamenti: radiale e tangenziale.

La posizione dei campioni rispetto al centro è definita in "vicino" entro metà del raggio macchina e "lontano" oltre la metà del raggio.

Le 20 posizioni richieste sono raccomandate dalla norma e riassunte in una tabella contenente le varie combinazioni.

Il tutto è rappresentato in Figura 1-15 e in Tabella 1-6.

Posizione n°	Lunghezza campione	"Spicchio"	Inclinazione	Posizione	Direzione
1	Corto	8	Orizzontale	Vicino	Radiale
2	Corto	5	Verticale	Vicino	Radiale
...
20	Lungo	1 & 2	45 gradi	Lontano	Tangenziale

Tabella 1-6 - Tabella riassuntiva delle posizioni del campione di misura

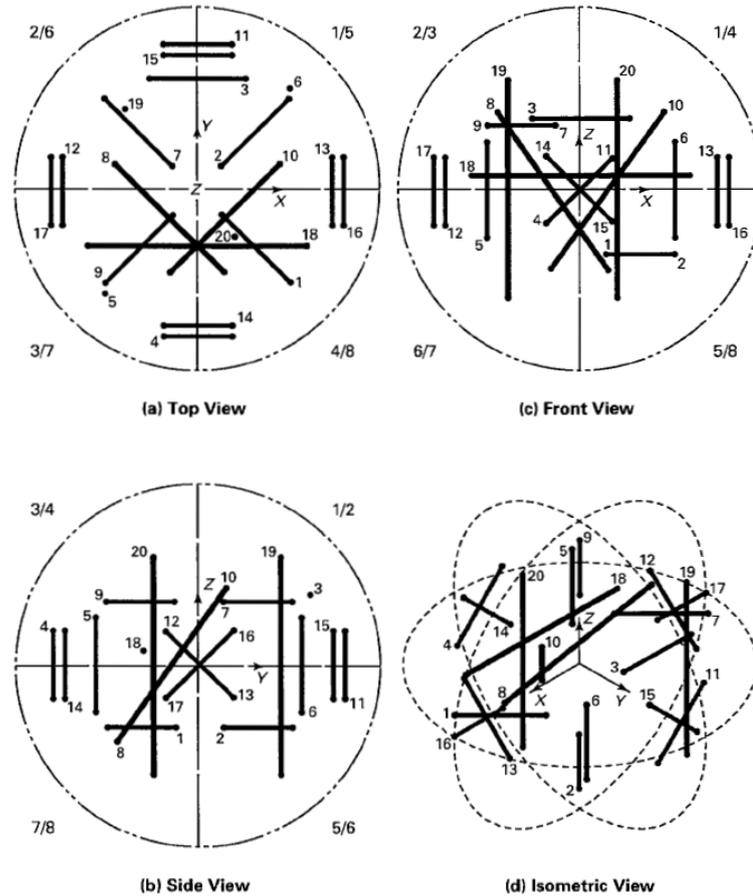


Figura 1-15 - Schema delle posizioni di "default" del campione per la verifica di dimensione

Da sottolineare che sono accettabili posizioni differenti in modo, comunque, che il volume di lavoro sia adeguatamente coperto.

I risultati si possono raccogliere in una tabella (Tabella 1-7), oppure in un grafico (Figura 1-16), che riporta i tre parametri richiesti per la valutazione:

1. Deviazione massima
2. Banda delle deviazioni
3. Due volte *RMS*,

dove
$$2RMS = 2\sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n}}$$

essendo D la deviazione in ciascuna posizione e n il numero delle posizioni.

Posizione n°	Lunghezza misurata	Lunghezza tarata	Deviazione D_i	D_i^2
1				
2				
...				
20				
Max deviazione				-
Banda (Dev.max-Dev.min)				-
2RMS				

Tabella 1-7 - Tabella di raccolta dei risultati delle misure di dimensione volumetrica

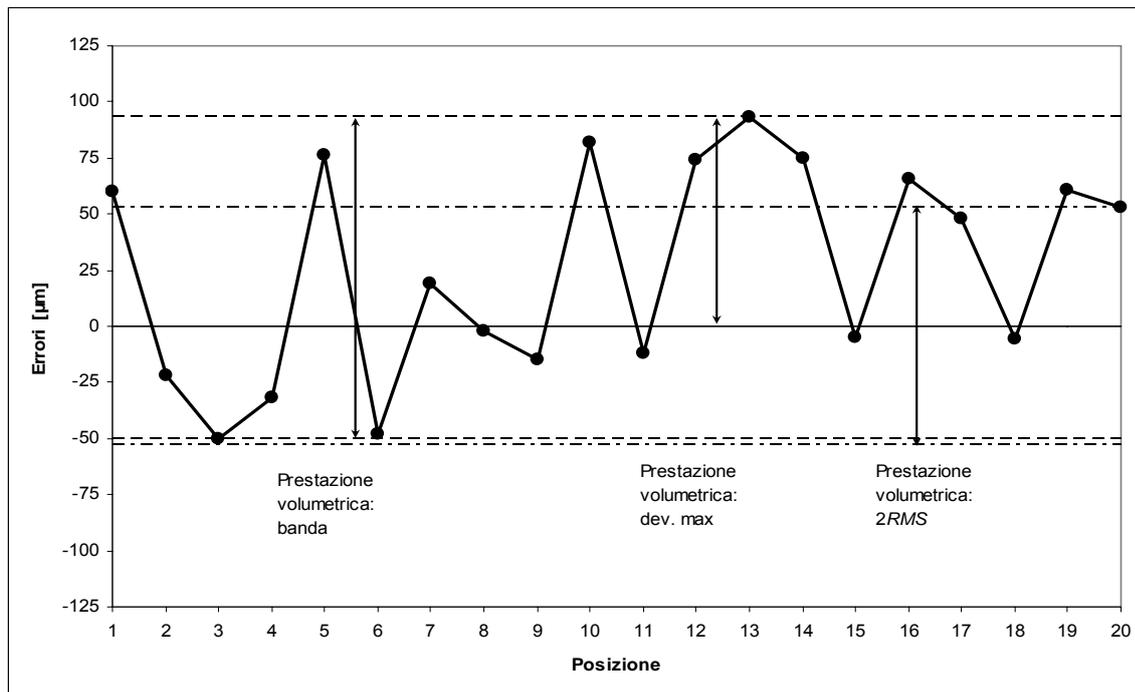


Figura 1-16 - Esempio di grafico per indicare la prestazione volumetrica del braccio di misura

Per tutte le prove è prevista la possibilità di ripetizione in caso di fuori specifica, per un massimo di 3 volte.

In caso di ripetizione di una o più posizioni della prova volumetrica, vi sono criteri di analisi associati alla ripetibilità (richieste 2 ripetizioni per posizione), da confrontare con $2s_{SPAT}$.

La conformità alle specifiche può essere valutata applicando le regole decisionali dettate dalla ISO 14253-1 oppure dalla ASME B89.7.3.1-2001 "Guidelines for Decision Rules: Considering Measurement Uncertainty Determining Conformance to Specifications".

La norma B89.4.22 non contiene solo la procedura per la valutazione delle prestazioni metrologiche, ma anche un'introduzione con glossario e terminologia, una classificazione delle macchine, alcune definizioni dei requisiti ambientali e loro procedure di verifica e numerose appendici non obbligatorie.

1.7.5.2 La norma VDI/VDE 2617-9

È una linea guida del 2006, e acquistabile anche in lingua inglese con la versione del 2009.. Essa trae ispirazione dalla ISO 10360-2 e dalla ISO 10360-5, con l'intenzione di integrarle per adattarle alle macchine a braccio articolato.

La sua applicabilità è prevista per le sole macchine con sistema a tastatore a contatto.

Come nella ISO 10360-2 sono previste due prove:

1. prova del sistema tastatore
2. prova dell'errore di indicazione per misure di dimensione.

La prova del sistema tastatore è ispirata alla ISO 10360-5 e prevede la valutazione dei seguenti parametri:

- MPE_{PS} per l'errore di dimensione (size)
- MPE_{PF} per l'errore di forma (form)
- MPE_{PL} per l'errore di posizione (location).

La prova si effettua utilizzando una sfera di riferimento posta in tre differenti posizioni nel volume di lavoro. Tali posizioni sono determinate come combinazioni di differenti altezze, settore circolare e distanze dal centro di rotazione. In ogni posizione si misura la sfera per cinque punti, con cinque diversi orientamenti del sistema tastatore, indicativamente lungo X, Y e Z. (Figura 1-17)

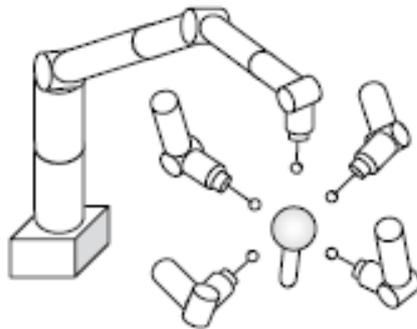


Figura 1-17 - Tastatura della sfera con 5 orientazioni del tastatore, come prescritto dalla norma VDI/VDE 2617-9

Utilizzando i cinque centri delle sfere così misurate si calcolano tutte le possibili combinazioni di distanze, per un totale di 10 distanze.

La massima delle 30 distanze così ottenute fornisce il valore di posizione del sistema tastatore PL.

I parametri relativi al valore dell'errore di dimensione PS e dell'errore di forma PF del sistema tastatore sono forniti rispettivamente dall'errore del diametro e dallo scostamento della rotondità ottenuti nel calcolo della sfera utilizzando la totalità dei 25 punti tastati in ciascuna posizione.

Per la prova dell'errore di indicazione per misure di dimensione, ovvero per la valutazione del parametro MPE_E , si possono utilizzare diversi tipi di campioni di lunghezza, ad esempio blocchetti piano paralleli, calibri a passi, barre a due sfere o a più sfere o a fori multipli, la cui

lunghezza massima deve essere almeno il 66% del diametro del volume di misura della macchina.

Analogamente a quanto prescritto dalla ISO 10360-2, occorre misurare cinque differenti lunghezze, ciascuna ripetuta tre volte e in sette differenti posizioni.

La conformità alle specifiche deve essere valutata tenendo in considerazione l'incertezza di test secondo i criteri dettati dalla ISO 14253-1.

1.8 Conclusioni

Nonostante la disponibilità di queste norme, i produttori dichiarano prestazioni metrologiche in modo non uniforme, a dimostrazione che tali norme non sono state recepite. Alcuni seguono la ISO 10360-2, altre verificano con prove ispirate alla B89.4.22, altri ancora non citano i riferimenti normativi.

Questo rende difficoltosa la comparazione tra macchine di differenti produttori e il confronto con le macchine di misura cartesiane, qualora ci si sovrapposizione applicativa con queste.

Vista la rapida diffusione delle macchine di misura articolate, la disponibilità di una norma internazionale sarebbe sicuramente di beneficio e di aiuto sia ai costruttori che agli utilizzatori.

2 Capitolo 2 - Sistemi ottici

2.1 Introduzione

Gli strumenti impiegati per misurare entità geometriche di un oggetto possono utilizzare diversi principi di funzionamento, che comportano o meno un contatto fisico tra l'oggetto da misurare e lo strumento di misura.

I più semplici prevedono il contatto tra un elemento esplorante e l'oggetto sottoposto a misura. Un esempio è il calibro, dove un braccio di riferimento tocca un'estremità dell'oggetto e un braccio mobile, in grado di traslare rispetto al primo, è dotato di un indice che mostra l'entità della misurazione.

Con lo stesso principio, ma aumentando la complessità meccanica dell'apparato di misura, sono state sviluppate le Macchine di Misura a Coordinate (CMM) già descritte nel capitolo precedente. La sonda, in questo caso, costituita da uno stilo rigido terminante con una sfera, viene appoggiata sulla superficie dell'oggetto e le letture delle misure avvengono simultaneamente lungo tre assi tra loro ortogonali.

Nonostante tale approccio sia molto accurato e per questo altrettanto diffuso nel campo dell'industria meccanica, diversi aspetti ne limitano l'uso in altre applicazioni, come quelle che fanno riferimento al design.

Il primo riguarda il volume di misura, che è vincolato alla lunghezza dei bracci meccanici ai quali è collegato il tastatore.

Un altro aspetto critico riguarda la velocità di misura. Questa non supera i 2-3 punti al secondo, poiché si devono muovere, automaticamente o manualmente, gli organi meccanici costituenti la CMM.

Infine un'altra limitazione è dettata dall'accessibilità delle superfici per il sistema tastatore. Pertanto non è applicabile l'uso delle CMM per la misura di piccoli fori o piccole cavità e per le misurazioni di interni ad elevata profondità rispetto alla superficie esterna del pezzo.

Questi motivi hanno spinto alla nascita di sistemi che non richiedessero solo il contatto fisico tra misuratore e misurato, ma che tale contatto fosse affiancato dall'interazione tra l'oggetto e una forma di energia radiante dalla quale estrarre le informazioni dimensionali di interesse. Tale forma di energia è la luce.

2.2 Sistemi di acquisizione dei dati

Le tecniche di acquisizione digitale di forme complessivamente possono essere suddivise in due tipologie: la tecnica tattile, dove la superficie dell'oggetto viene rilevata da un tastatore meccanico montato sulla parte terminale di un braccio robotico ed utilizzato anche sulle macchine di misura a

Coordinate e la tecnica senza contatto, basata su scansioni ottiche, acustiche e magnetiche.



Figura 2-1 - Schema delle tecniche di acquisizione

Tra le varie tecniche non tattili di digitalizzazione per il rilievo di forme, quelle di tipo acustico e magnetico risultano essere le meno popolari perché adatte a ristretti campi d'applicazione e facilmente perturbabili da interferenze e rumori esterni.

Per quanto riguarda i sistemi di digitalizzazione tridimensionale basati su tecnologia ottica, si può dire che risultano essere i più utilizzati data l'alta velocità di acquisizione e la quantità di dati rilevabile con ottima precisione. Considerando anche la flessibilità di tali sistemi e la versatilità ad adattarsi ai vari settori d'interesse, risulta evidente il motivo per il quale i vari centri di ricerca e sviluppo si stiano concentrando maggiormente su questo tipo di tecnologia.

Tali metodi di misura, impiegati per effettuare l'acquisizione 3D, analizzano le alterazioni che un oggetto apporta alla luce e da queste ricavano informazioni di carattere metrico, come le coordinate spaziali dei punti della superficie.

Le tre principali alterazioni sono:

1. riflessione: avviene quando i raggi luminosi colpiscono una superficie.

Il fenomeno della riflessione è quello che si presta maggiormente all'utilizzo per scopo di misura nei sistemi che sfruttano la luce.

Si possono distinguere vari tipi di riflessione:

- Speculare o regolare: l'energia luminosa che incide sulla superficie secondo un dato angolo viene restituita interamente in direzione simmetrica a quello di incidenza rispetto alla normale alla superficie (es. specchio). L'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione
- Diffusa: l'energia luminosa che incide la superficie viene restituita in tutte le direzioni a partire dal punto di incidenza. Se la restituzione è uguale in tutte le direzioni (isotropia) si parla di superficie lambertiana
- Mista: è una combinazione di riflessione regolare e diffusa; la luce si distribuisce in tutte le direzioni, con maggiore intensità nella direzione della riflessione regolare.

2. trasmissione-rifrazione: un fascio di luce che incontra un prisma o un corpo trasparente, devia dal percorso iniziale. Nel caso del prisma, se la luce è policromatica, essa si scompone nei colori dell'iride. Il valore dell'angolo di deviazione dipende sostanzialmente da una proprietà del mezzo (indice di rifrazione) e dall'angolo di incidenza del raggio luminoso sulla superficie.

La trasmissione si definisce:

- diretta: quando il mezzo (vetro, plastica) lascia passare gran parte del flusso luminoso;
- diffusa: quando la luce uscente dal mezzo si diffonde in tutte le direzioni (materiale traslucido);
- mista: quando la luce si diffonde secondo una direzione privilegiata.

3. assorbimento: la luce, a seconda del mezzo che incontra, viene in parte assorbita, in parte riflessa, trasmessa e rifratta. I raggi assorbiti si trasformano in energia termica

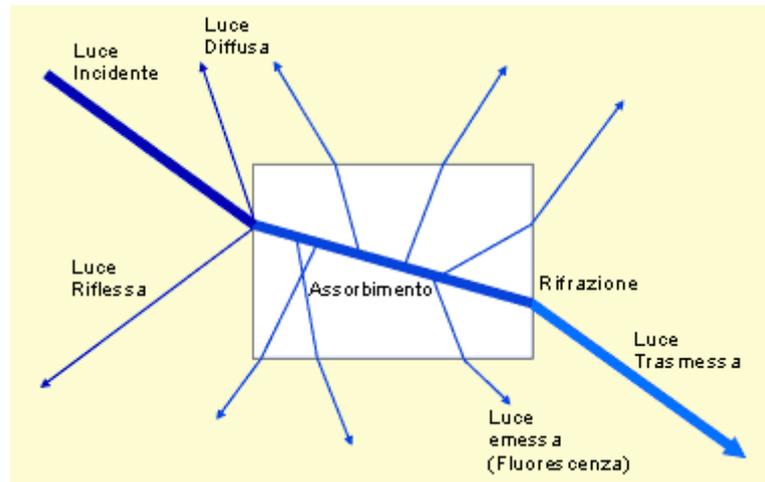


Figura 2-2 - Rappresentazione delle alterazioni della luce

L'assorbimento, la riflessione e la trasmissione della luce sono importanti perché danno informazioni qualitative essenziali alla comprensione delle proprietà fisiche delle sostanze. Quando un fascio di luce colpisce l'interfaccia tra due mezzi diversi, come l'aria e le superfici da misurare, si può asserire che una quota dell'energia totale viene assorbita, una trasmessa e una riflessa, come rappresentato in Figura 2-2.

I materiali reali hanno un comportamento intermedio che dipende soprattutto dal grado di levigatezza della superficie. Più la superficie è scabra, maggiore sarà l'effetto diffusivo, mentre una lavorazione raffinata farà assumere alla superficie un comportamento speculare.

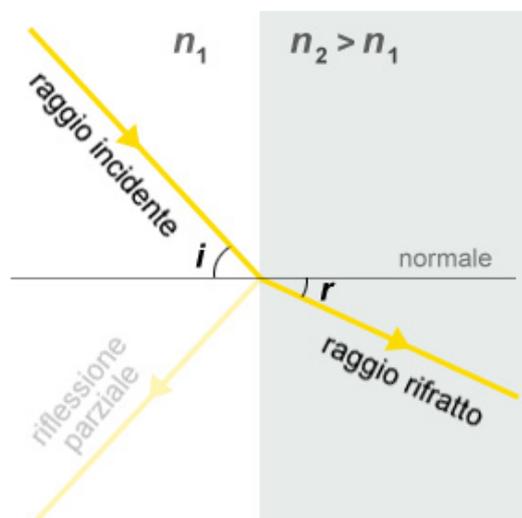


Figura 2-3 - Esempio di riflessione e rifrazione

2.3 I sensori tridimensionali

I sensori tridimensionali ottici sono quegli strumenti che consentono di generare un'immagine 3D della scena che inquadrano e possono essere suddivisi in due grandi gruppi: passivi ed attivi. Tali tecniche sono rappresentate in Figura 2-4.

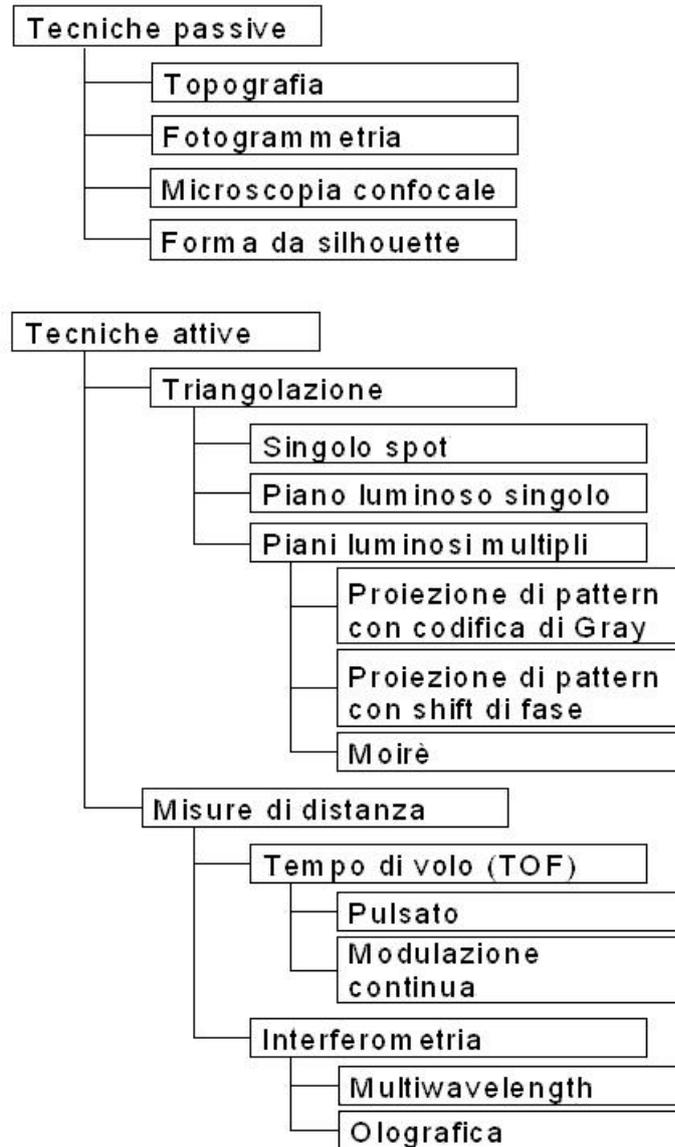


Figura 2-4 - Suddivisione delle tecniche ottiche di acquisizione digitale 3D in funzione della modalità di interazione con l'oggetto reale e delle proprietà della luce utilizzata

Acquisizione Ottica Passiva: è una tipologia di tecniche di scansione digitale che non prevede l'utilizzo di sorgenti luminose artificiali. Ciò permette una forte riduzione di costo rispetto alle tecniche di tipo attivo ma contemporaneamente una precisione di rilevazione digitale decisamente più bassa, pertanto è adatta principalmente al settore architettonico, alla rilevazione dei beni culturali ed alla redazione di cartografie speciali su grande scala (1:500–1:200).

Solo a titolo d'esempio, alcuni metodi passivi sono la celerimensura (per il rilievo fotografico), la fotogrammetria, impiegata dalla realizzazione di rilievi cartografici o fotogrammetria aerea, alle misure industriali al design, e la foto scultura.

Acquisizione Ottica Attiva: è una tipologia di tecniche di scansione digitale per il rilievo di oggetti reali il cui funzionamento prevede la presenza di una sorgente di luce artificiale ed uno o più sensori atti a rilevare i pattern luminosi riflessi dall'oggetto.

La sorgente può emettere pattern luminosi di diverso tipo, scelti in funzione dell'accuratezza richiesta nell'acquisizione dei dati ed in base al tipo di analisi che deve essere eseguita sull'oggetto reale.

Pertanto con un metodo passivo viene misurata una proprietà fisica dell'ambiente (una scena inerte), mentre i sensori attivi forniscono un proprio segnale/stimolo e lo usano facendolo interagire con l'ambiente.

I metodi di misura per ottenere i dati geometrici si possono dividere ulteriormente in non-distruttivi e distruttivi, ed includono 3 classi di tecniche.

1. non distruttiva: usa radiazioni luminose non ionizzanti per esplorare senza contatto fisico la superficie di un oggetto (es. infrarosso)
2. non distruttiva: usa radiazioni ionizzanti (es. raggi X) che hanno una potenza molto maggiore della luce visibile e possono quindi penetrare all'interno di determinati materiali (es. TAC)
3. distruttiva: è previsto un sezionamento fisico dell'oggetto con sezioni piane ravvicinate tra loro e l'acquisizione di un'immagine per ogni sezione generata.

2.3.1 I sensori attivi 3D

L'invenzione del laser negli anni '50 ha permesso la creazione di sistemi di acquisizione tridimensionali detti attivi, mentre l'avvento del computer ha fatto aumentare l'interesse e lo sviluppo delle tecniche di acquisizione delle forme tramite metodi ottici.

La luce che investe l'oggetto da misurare assume una struttura definita a priori e nota al sensore.

Inoltre la sorgente di luce è integrata nel sensore e l'illuminazione viene opportunamente sincronizzata con la fase di acquisizione.

Il vantaggio principale prodotto da una sorgente luminosa controllata è la possibilità di automatizzare il processo di misura dei punti che non devono essere traggurati da un operatore umano ma possono facilmente essere individuati dal sensore stesso.

Inoltre è possibile accumulare in pochi secondi migliaia di punti di misura.

Infine l'uso della luce permette una misure spaziale ad alta risoluzione rispetto a tecniche basate sul contatto o sull'uso di forme di energia diverse come gli ultrasuoni.

Tali sensori, poi, non sono soggetti all'influenza di fattori ambientali come la temperatura e l'umidità.

Si è visto che con una tecnica passiva (fotogrammetria) sono misurabili le coordinate 3D dei soli punti identificabili nelle immagini con variazioni di luminanza ben contrastate, ma se si deve misurare un oggetto senza una texture contrastata (parete bianca, superficie a tinta unita) la selezione va fatta con ausili (marker o target da applicare alla superficie).

I sistemi attivi, in particolare quelli basati su luce laser, rendono indipendente il risultato delle misure dalla texture del soggetto da riprendere, modificandone l'aspetto esteriore con luce opportunamente codificata, ossia una luce caratterizzata da un contenuto informativo riconoscibile da un sensore elettronico (es. una matrice di puntini luminosi o una serie di strisce colorate).

I metodi 3D attivi sono quelli più diffusi perché sono gli unici che permettono di individuare la geometria di una superficie in modo totalmente automatico.

Lo strumento che impiega una tecnica 3D attiva viene chiamato range camera o, facendo riferimento alle realizzazioni basate su laser, scanner 3D. Il principio di funzionamento varia a seconda delle dimensioni dell'oggetto da riprendere e della distanza tra sensori e oggetto: per volumi di misura medio-piccoli gli scanner si basano sul principio della triangolazione, per volumi di misura superiori si utilizzano sensori detti a tempo di volo (TOF).

La forma di luce che ha consentito di realizzare uno scanner 3D è la luce laser che, per le sue proprietà fisiche, permette di generare spot luminosi estremamente focalizzati su intervalli di distanza elevati. Infatti il laser, dal punto di vista fisico, è una radiazione elettromagnetica, ovvero un'onda luminosa, avente le seguenti caratteristiche:

- monocromaticità: deve essere composta da una sola frequenza di luce, non come la luce di una lampada che, pur sembrando bianca, è composta da molte frequenze di luce appartenenti allo spettro visibile all'occhio umano.
- coerenza spaziale o unidirezionalità: deve essere composta da un'onda che non viene irradiata in tutte le direzioni, ma si propaga a grande distanza e con estrema direzionalità.
- coerenza temporale: deve essere costituita da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano l'una all'altra originando un treno di luce che può essere spinto ad elevata intensità e potenza.

2.3.2 La triangolazione ottica

La triangolazione ottica è una delle tecniche più comuni nell'acquisizione di dati tridimensionali.

Può essere utilizzata con diversi tipi di luce proiettata, per cui il principio della triangolazione può dar luogo a diversi metodi che operano

- misura su singolo punto 1D (spot a laser singolo)
- misura su profilo 2D (laser piano)
- misura su area (fasci di luce strutturati e i pattern di luce comune) tramite:
 - scansione tramite laser diffuso da galvanometro
 - testa laser accoppiata a motori per rotazione e traslazione, bracci articolati e sistemi per la misura di coordinate o Coordinate Measuring Machines (CMM), inseguitori di posizione (trackers)
 - proiezione di matrici di punti e proiezioni di linee basate su reticoli di diffrazione
 - proiezione di pattern di luce bianca
 - effetto Moirè.

Schema di principio di uno scanner 3D a triangolazione.

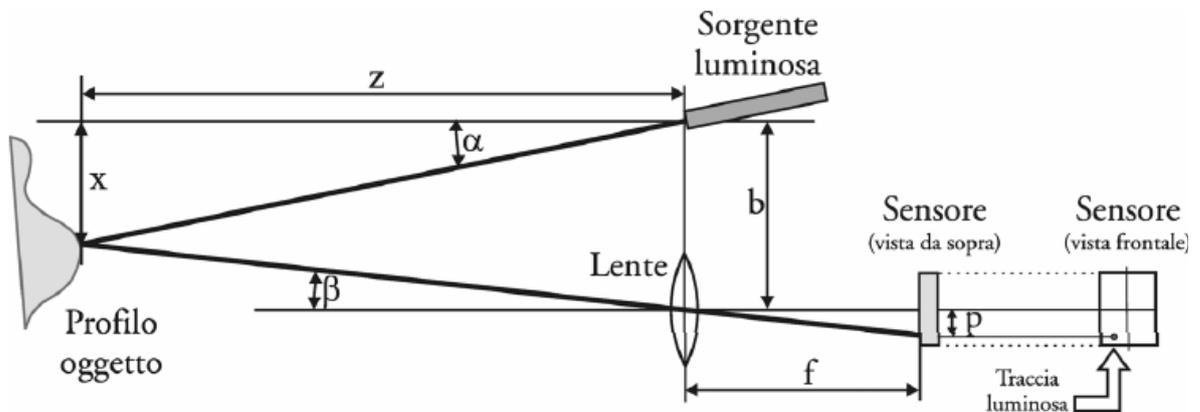


Figura 2-5 - Triangolazione ottica di tipo attivo a spot puntiforme.

Il principio di funzionamento è abbastanza semplice: la sorgente laser genera un fascio di luce che produce un puntino luminoso sulla superficie da misurare.

Attraverso un sensore di ripresa (es. una videocamera CCD) spostato lateralmente rispetto alla sorgente luminosa viene rilevata l'immagine del puntino luminoso. In questo modo la sorgente, il centro di proiezione sul sensore e il punto luminoso riflesso dalla superficie formano un triangolo e la posizione della luce sul sensore CCD permette di determinare la posizione nello spazio del punto P .

Difatti, se il sistema è calibrato, sono note a priori la grandezza b , distanza relativa tra la sorgente e sensore CCD e l'angolo α , inclinazione della sorgente, con relazioni trigonometriche si determinano le coordinate del punto P .

b = baseline

distanza tra sensore e sorgente di luce

f = distanza focale o distanza principale

distanza a cui si trova il piano di ripresa dal foro di entrata della luce.

L'immagine del punto luminoso viene focalizzato sul piano di ripresa del sensore, ad una distanza p rispetto al centro ottico del sistema.

Se il sistema è calibrato sono noti a priori sia l'inclinazione α della sorgente luminosa, sia la distanza b tra sensore e sorgente.

La stima della posizione del puntino focalizzato sul piano del sensore consente di misurare la distanza p rispetto al centro ottico. Attraverso la geometria di proiezione attraverso il fuoco dell'ottica e utilizzando il teorema degli angoli opposti si può risalire all'angolo β .

$$\tan \beta = \frac{p}{l}$$

Mediante relazioni trigonometriche si risale alla distanza z , tra la camera e il punto sull'oggetto.

$$z = \frac{b}{\tan \alpha + \tan \beta}$$

Moltiplicando tale valore per la tangente di α si ricava la coordinata x

$$x = z \cdot \tan \alpha$$

e sostituendo

$$x = \frac{b}{1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}}$$

È quindi possibile definire il punto $P(x, z)$, in coordinate assolute, secondo le coordinate (b, β) nel sistema di riferimento relativo della videocamera.

La coordinata y , nel caso di singolo spot laser, non è rilevante, ma si può determinare montando il sistema di misura su un trascinamento meccanico che fornisca la propria posizione rispetto alla quale valutare la distanza del bersaglio. Dalla sequenza di punti 1 D nello spazio si ottengono infatti le sole coordinate x e z .

Lo schema sopra proposto può essere esteso da un singolo spot luminoso ad un insieme di punti allineati che vanno a formare un segmento: lama di luce laser. Infatti se invece di utilizzare uno spot singolo proiettiamo una striscia luminosa parallela al piano X-Z, si ottengono più punti contemporaneamente, come mostrato in fig.

Vengono valutati tutti insieme i punti acquisiti da un sensore bidimensionale come un CCD e per ciascuno di essi si effettua il calcolo sopra descritto, ottenendo in soluzione unica le coordinate corrispondenti al segmento illuminato. Ossia si ricavano le coordinate x , y e z di punti 2D.

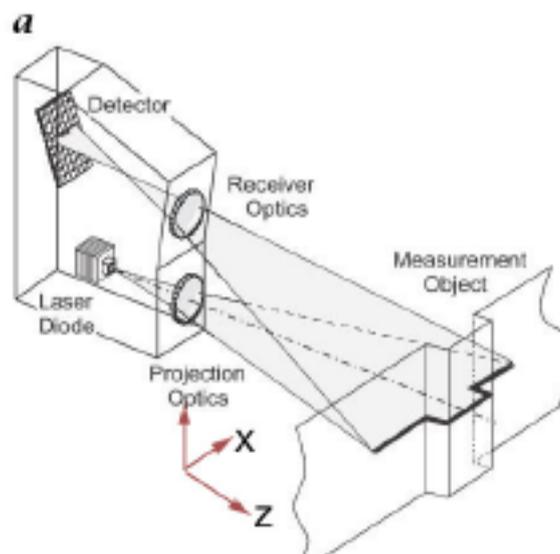


Figura 2-6 - Scansione 3-D tramite strisce laser: Digitalizzatore ottico

Inoltre ci sono sensori in grado di acquisire una nube di punti 3D relativa ad una porzione di superficie. Infatti proiettando più strisce di luce contemporaneamente, ovvero un volume di luce, si possono ottenere le posizioni di un numero di punti della superficie sufficienti a descriverla.

Il caso generale di una triangolazione in una configurazione 3D richiede di includere la dimensione verticale, nel caso specifico l'asse Y.

Per avere un'immagine tridimensionale relativa ad un'area è necessario muovere i sensori in maniera meccanicamente controllata, che porta al concetto di scansione.

Nel caso di sistemi a lama di luce laser la copertura di un'area può avvenire con movimento rotatorio o traslatorio della testa di scansione, prodotto da una meccanica che sposta la lama di luce in direzione ortogonale alla direzione del segmento di luce proiettato.

Nella configurazione 3D la videocamera e il dispositivo di proiezione si possono trovare disposti in modo arbitrario. L'asse Z rappresenta ancora l'asse ottico della videocamera mentre si assume che il centro ottico della sorgente di luce si trovi sull'asse X. A differenza del caso 2D, il raggio di luce non è più costretto sul piano XZ. Il raggio di luce è rappresentato da un segmento con origine, secondo il sistema di riferimento assoluto, in $(b,0,0)$ e punto finale in $P(x,y,z)$. Gli angoli α e γ definiscono la direzione del raggio di luce nello spazio 3D secondo lo schema indicato in Figura 2-7.

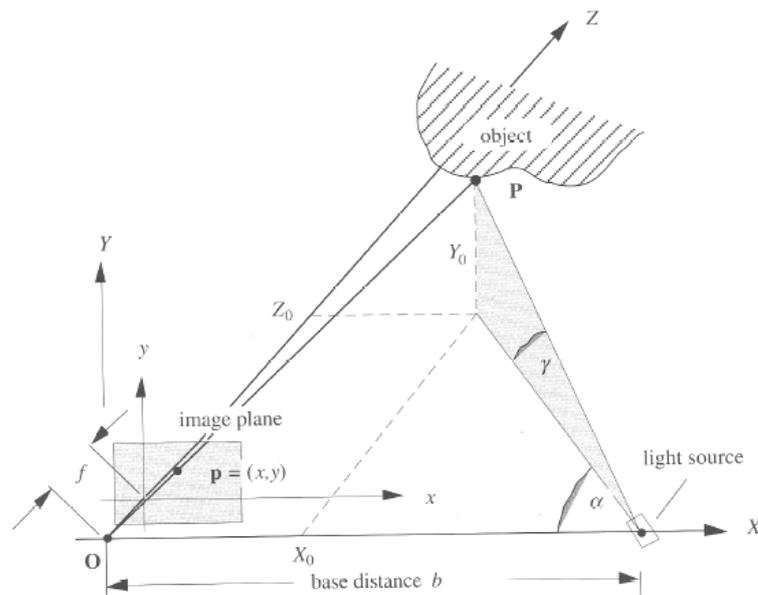


Figura 2-7 - Principio di triangolazione per un sensore 3D

Sensori a luce strutturata

Un metodo alternativo a quello basato sulla proiezione di lame di luce laser è quello che utilizza sensori a luce strutturata.

Grazie ad un idoneo proiettore le lame di luce sono prodotte tutte insieme e l'immagine della superficie investita da questo pattern luminoso è acquisita con una telecamera digitale.

I sistemi di questo tipo proiettano più pattern in sequenza secondo un opportuno codice (Gray code), ossia raddoppiando progressivamente il numero di strisce verticali a partire da

una sola transizione bianco/nero, fino ad arrivare alla massima frequenza di alternanza nero/bianco.

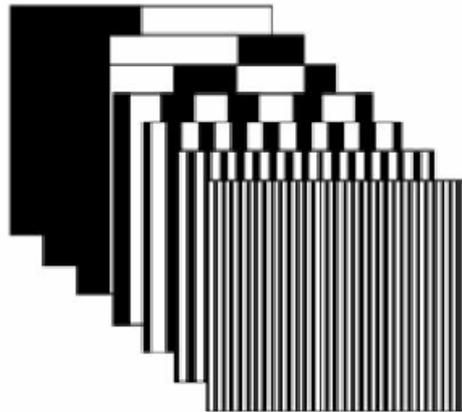


Figura 2-8 - Pattern luminosi della sequenza di GRay

Più transizioni si riescono ad avere nell'immagine e più fine sarà il campionamento spaziale della superficie, con un conseguente aumento della risoluzione.

Ogni transizione da bianco a nero all'interno del pattern svolge il compito della lama di luce laser visto in precedenza.

Inoltre l'immagine prodotta dal proiettore (es. una sequenza di strisce verticali alternate bianche e nere) vista dalla telecamera sarà ancora una sequenza di strisce se la proiezione avviene su un piano, mentre queste tenderanno a distorcersi diversamente a seconda della forma della superficie sottostante.

Una modalità alternativa per identificare le distanze sfrutta l'effetto Moirè, che consiste nel generare figure di interferenza a partire dalla sovrapposizione tra due pattern simili ma non identici.

Tale principio applicato al rilievo dimensionato permette di valutare la deviazione della planarità su di un piano, poiché un pattern sinusoidale proiettato su un piano rimane invariato, mentre se la superficie ha andamento non piano la deviazione della planarità produce sul pattern sinusoidale una serie di stiramenti e compressioni che si possono vedere e valutare come variazioni locali della fase di pattern, la cui entità è direttamente correlata all'ampiezza della deviazione.

Il processo di estrazione delle coordinate in un sistema a proiezione di pattern può basarsi anche su tecniche che possono dar uso di forme diverse delle bande verticali. Ad esempio la proiezione di cerchi in bianco e nero, strisce verticali colorate, pattern pseudo-casuali o griglie rettangolari, impiegate anche per valutare figure di interferenza.

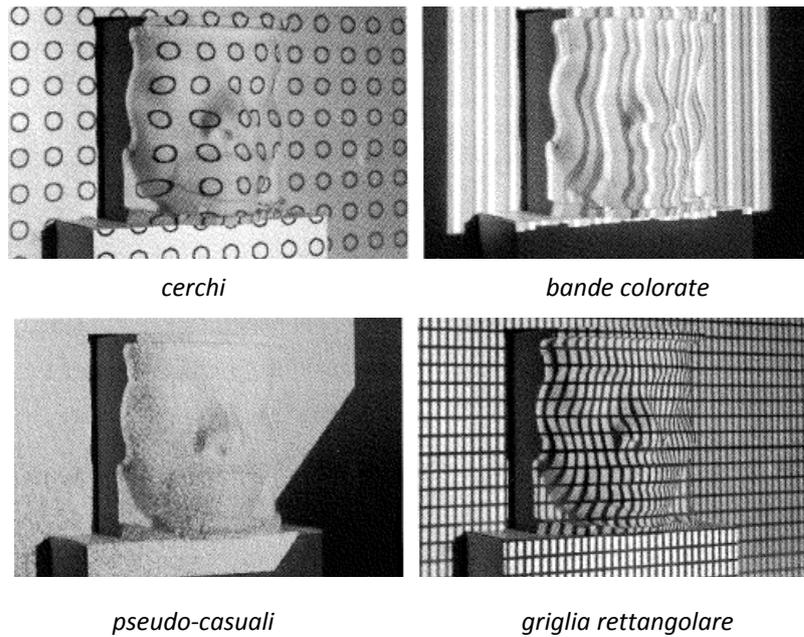


Figura 2-9 - Esempi di pattern

Sensori basati sulla misura di distanza

Un sistema a triangolazione è adatto per misurazioni di piccoli volumi e, generalmente, per un uso corretto, si utilizza una distanza camera-sorgente (baseline) dello stesso ordine di grandezza della distanza camera-superficie da misurare.

Per oggetti più grandi, ad esempio edifici, si utilizza un principio di misura differente, che consente di inquadrare aree a grande distanza dal sensore.

Si ricorre ad apparecchi ottici dotati di traguardo, in grado di misurare con grande precisione la direzione di puntamento, a cui si aggiunge un distanziometro che prevede l'invio di impulso laser e la successiva misura del tempo impiegato dalla luce per andare sulla superficie e tornare fino allo strumento di misura (tempo di volo).

Tale intervallo di tempo consente di ricavare la distanza tra lo strumento e la superficie che, unita alla conoscenza degli angoli, permette di risalire alle coordinate 3D della zona puntata dal laser.

Schema di principio di uno scanner 3D a tempo di volo

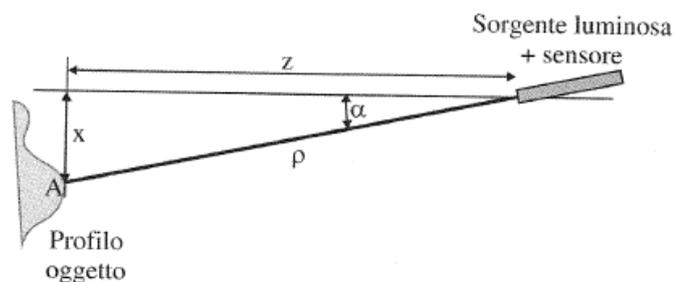


Figura 2-10 - Schema di principio di uno scanner a TOF

In Figura 2-10 si vede uno schema funzionale del sistema sul piano xz.

L'angolo α viene misurato grazie al sistema di movimentazione meccanica della sorgente, mentre la distanza ρ attraverso la stima del tempo di volo.

Si possono ricavare le coordinate (x_A, z_A) di un punto sulla superficie dell'oggetto:

$$x_A = \rho \cdot \sin \alpha$$

$$z_A = \rho \cdot \sin \alpha$$

La distanza coperta dall'impulso luminoso per andare e tornare dal bersaglio, che è doppia rispetto a quella effettiva r che lo separa dal sensore, può essere espressa ricordando che il percorso è pari al prodotto tra la velocità e il tempo:

$$2 \cdot r = TOF \cdot c$$

$$r = TOF \cdot \frac{c}{2}$$

dove c è la velocità della luce e pari a:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Se viene misurato anche il secondo angolo (uno in orizzontale e uno in verticale) si può calcolare la terza coordinata y_A .

A causa dell'elevatissima velocità della luce i tempi in gioco sono estremamente ridotti e questo introduce aleatorietà nella stima del tempo di volo, che si traduce in un'elevata incertezza di misura.

Sistemi di questo tipo, infatti, hanno un'incertezza di misura dell'ordine di qualche millimetro, oltre 20 volte peggiore dell'incertezza di un sistema a triangolazione.

2.3.3 Meccanismi di scansione

Il rilievo delle superfici tridimensionali può avvenire con diversi sistemi di acquisizione tridimensionali. Le prestazioni raggiunte da questi strumenti dipendono strettamente dal principio di funzionamento e dal meccanismo sul quale si basa il funzionamento dello scanner 3D.

Si possono individuare tre metodi di base per l'acquisizione di superfici:

- singolo spot di luce;
- lama di luce o scanner su slitta;
- funzionamento di un sistema TOF con piani focali.

Tralasciando i sistemi TOF di cui se ne è già discusso, di seguito viene presentata una sintesi di meccanismi di acquisizione 3D con sistemi a triangolazione.

Una prima tipologia di strumenti è quella basata sul singolo spot laser con un sensore lineare o bidimensionale che misura gli angoli generati dal raggio. Segue una descrizione del meccanismo:

- il segnale di triangolazione si muove su un sistema meccanizzato definito da tre livelli di traslazione;
- il raggio laser viene riflesso da due specchi montati in maniera ortogonale che permettono la definizione di un percorso di scansione regolare o la generazione di percorsi definiti a priori come nel caso delle figure di Lissajous.
La scansione può essere accompagnata dall'uso di uno specchio montato su un galvanometro e uno specchio poligonale.
- Il raggio laser viene proiettato attraverso i due specchi inclinati in una particolare direzione, dopodiché il dispositivo meccanico permette il movimento sulla superficie grazie a meccanismi di rotazione, traslazione o tracciamento, di tipo magnetico, ottico o a ultrasuoni.

Una seconda tipologia è basata sulle aree di luce laser (sheet light) o scanner a slitta con sensori bidimensionali che registrano gli angoli del fascio di luce.

Il sistema presenta le seguenti peculiarità:

- L'area di luce è riflessa da uno specchio che interseca il piano di scansione perpendicolarmente e attribuisce al fascio una direzione angolare.
- La direzione del fascio di luce viene nuovamente modificata attraverso il movimento di un secondo specchio che ruota parallelamente all'asse del fascio di luce.
- Il raggio emesso dallo scanner viene traslato in una direzione ortogonale al piano di scansione attraverso un sistema di traslazione meccanico.
- Un tale sistema a triangolazione può essere montato su di un braccio articolato su cui sono incorporati alcuni sensori di posizione o utilizzato in coppia con un sistema di tracciamento (tracker).
- Il sistema di scansione può essere dotato di un sistema ottico di diffrazione, in grado di produrre molteplici raggi laser.

In commercio esistono già delle soluzioni che integrano i diversi sistemi di acquisizione 3D e garantiscono un buon livello di qualità, finalizzate ad aumentare il campo di applicazione e a migliorarne le prestazioni.

Le soluzioni proposte riguardano in particolare le range camera a triangolazione che vengono integrate con CMM, bracci articolati di misura, Laser Tracker, sistemi ad ultrasuoni e sensori magnetici.

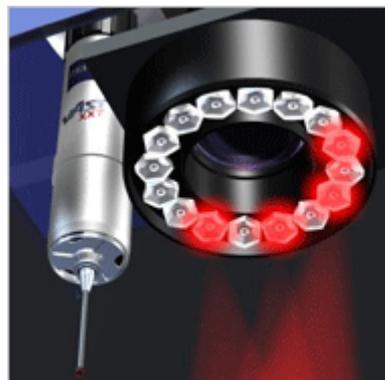


Figura 2-11 - Sensore ottico e a contatto

I sistemi con CMM sono precisi e permettono un riallineamento immediato delle varie riprese ma non sono portatili e il volume di misura è limitato al volume di lavoro della CMM. In Figura 2-12 si vede un esempio di scanner integrato a CMM.



Figura 2-12 - CMM con sensore ottico

Il laser può essere integrato ad un braccio articolato, che comunque circoscrive il raggio d'azione dello scanner ad un volume ancora abbastanza limitato. (Figura 2-13)



Figura 2-13 - Braccio di misura articolato con sonda a contatto e con sonda laser

Tali sistemi sono adatti al controllo qualità in ambiti industriali, la cui precisione ha valenza strategica e al rilevamento nel campo della conservazione dei beni culturali. La loro applicazione è limitata ad una categoria di misure ripetitive e precise, in quanto la struttura del sistema implica una limitazione nel massimo volume lavorabile.

Pertanto solo fasi critiche e rilevanti di un processo di produzione giustificano l'utilizzo di tali sistemi di misura, a causa del loro elevato costo.

2.3.4 Applicazioni dei sistemi ottici

Un'analisi dei differenti metodi di acquisizione tridimensionale dimostra come ci siano molteplici soluzioni nella realizzazione di progetti di acquisizione che offrono vantaggi complementari tra loro.

Per questo negli ultimi anni si sono individuate modalità di integrazione tra sensori diversi tali da offrire capacità di rilievo superiori alle singole tecniche.

Le varie categorie di strumenti sono caratterizzate da accuratezza, precisione e risoluzione differenti tra loro e le applicazioni nelle quali vengono impiegati sono diverse e legate alla capacità dello strumento di poter acquisire date superfici.

Si presenta di seguito un breve resoconto per mostrare come i diversi sistemi ottici 3D attivi e passivi siano adatti a coprire diverse aree applicative.

Questo si può evidenziare con la Figura 2-14 in cui sono riportate le differenti caratteristiche dei due sistemi di acquisizione tridimensionale attiva e i relativi campi di applicazione.

La risoluzione è quella laterale xy, mentre l'incertezza è quella in z.

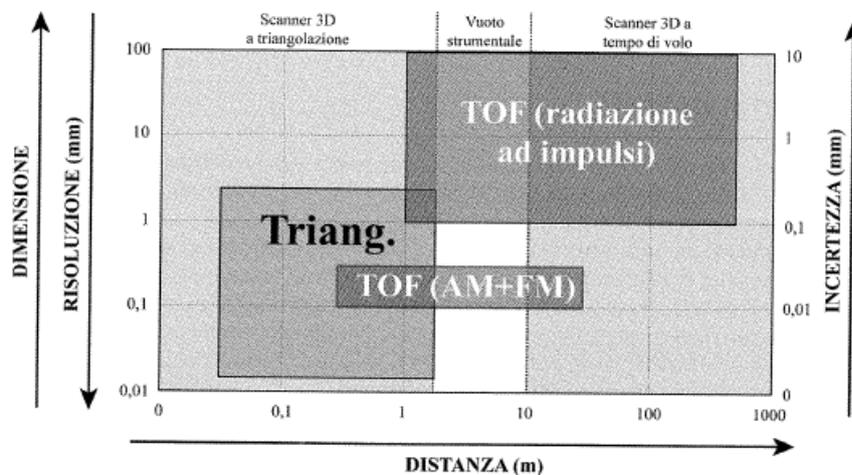


Figura 2-14 - Campo di applicazione dei sensori ottici

È presente una zona di vuoto strumentale dovuta al fatto che i sistemi a triangolazione perdono molta precisione nei rilievi a distanza di presa maggiore di 2-2,5 metri, mentre i sistemi a tempo di volo possiedono parametri di precisione inadeguati alle aspettative a quella distanza.

La considerazione che ne discende è relativa alla necessità di definire un metodo di rilievo che possa colmare tale vuoto.

Una prima soluzione è data dall'integrazione di queste due tecnologie, che permette, come mostrato in Figura 2-15 non solo di coprire la zona scoperta, ma anche di ampliare il campo di applicazione di entrambi gli strumenti.

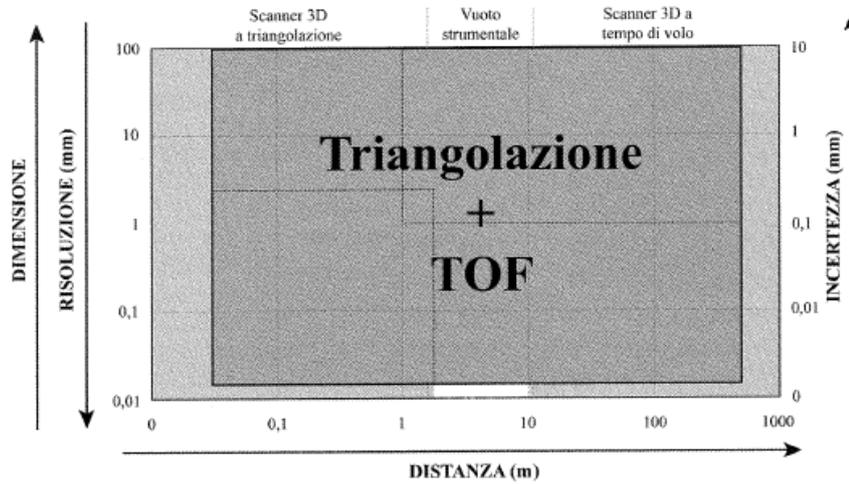


Figura 2-15 - Integrazione delle tecnologie dei sensori ottici

Una seconda soluzione è data dall'integrazione di macchine di misura a coordinate con sistemi di visione attivi, nel caso specifico, oggetto di questo studio, bracci di misura a coordinate con scanner laser a triangolazione.

Infatti il solo scanner laser a triangolazione permette di rilevare con precisione i dettagli dell'oggetto ma è fortemente limitato da un campo di presa e una distanza di lavoro molto piccoli, che comportano la necessità di lavorare sempre molto vicino all'oggetto.

Un braccio di misura a coordinate, che arriva fino a 3,7 metri, con integrato un sistema di misura a scansione non a contatto, permette un'acquisizione rapida e dinamica.

L'uso integrato di sistemi a contatto e non a contatto ha visto un progressivo aumento di impiego in molte applicazioni: dal settore dell'automotive al settore architettonico, dal design all'archeologia, su diverse tipologie di oggetti, differenziati sia per dimensione di scala che per caratterizzazione geometrica, e con diverse finalità: dal controllo in qualità al reverse engineering.

2.4 Caratterizzazione di un sensore ottico 3D

2.4.1 Parametri caratteristici di un sistema ottico

Quando si utilizza un sensore tridimensionale per un determinato rilievo è fondamentale conoscere i parametri caratteristici dello strumento, quali ad esempio incertezza di misura o accuratezza, in modo da utilizzare la strumentazione 3D nella maniera più appropriata.

Per questo i produttori di sistemi per acquisizioni tridimensionali indicano alcuni dati caratteristici sulla loro documentazione tecnica, ma ad oggi non esiste ancora uno standard internazionale riconosciuto per l'identificazione dei parametri funzionali degli scanner 3D.

Le fasi che devono essere tenute sotto controllo per avere conoscenza delle prestazioni metrologiche complessive del processo di acquisizione e modellazione digitale sono rappresentate in Figura 2-16.

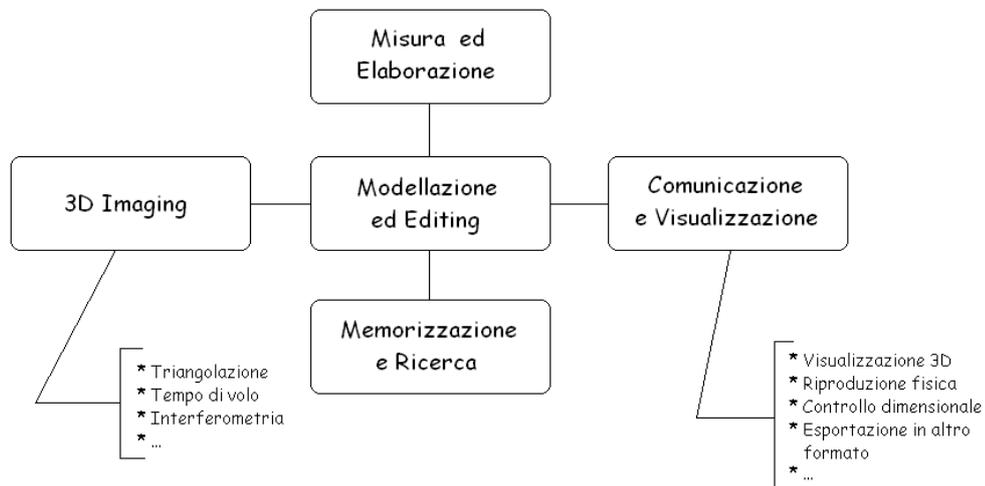


Figura 2-16 - Fasi che influenzano il processo di acquisizione

Indipendentemente dalla tipologia del sensore, sia esso a triangolazione, a tempo di volo o interferometrico, la prestazione complessiva dipende dalle caratteristiche delle ottiche, dell'elettronica e degli algoritmi che permettono di trasformare i dati grezzi in misure spaziali.

In Figura 2-17 sono sintetizzati i fattori determinanti sull'incertezza di un sistema 3D.

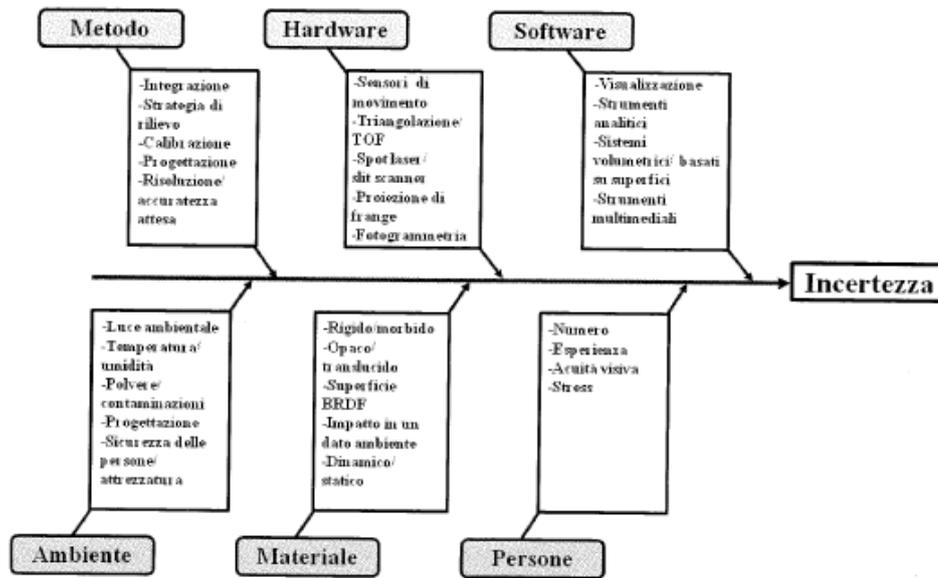


Figura 2-17 - Fattori di incertezza nel processo di acquisizione

Infatti se da un lato le prestazioni di uno strumento possono essere valutate dal punto di vista *qualitativo* utilizzando i parametri di risoluzione, incertezza e accuratezza e considerando gli effetti legati al materiale dell'oggetto e ai dettagli geometrici della superficie, dall'altro esse devono essere completate con una valutazione *quantitativa* sul loro livello di incertezza.

Questa valutazione qualitativa e quantitativa del rilievo nasce dal fatto che i sistemi di acquisizione restituiscono delle coordinate spaziali che rappresentano una stima approssimata della superficie campionata.

È essenziale avere il controllo su tutti gli aspetti che introducono incertezza nel processo di acquisizione e successivamente di modellazione tridimensionale, in modo da poter garantire una tracciabilità metrologica del processo di generazione per acquisizione di un modello tridimensionale digitale.

I sistemi 3D imaging restituiscono un'approssimazione discreta tridimensionale della superficie rilevata, con un livello di qualità che dipende da diversi fattori. Esistono infatti una serie di sorgenti di errore che dipendono dallo strumento utilizzato, dall'ambiente nel quale avviene il rilievo, dall'oggetto da rilevare e dall'operatore, e che portano ad errori di misura.

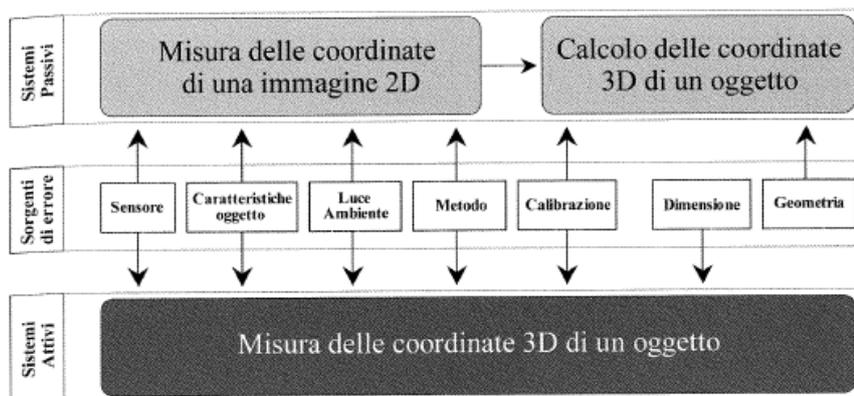


Figura 2-18 - Fonti di errore di un sensore ottico

Per poter controllare il comportamento dello strumento e gli errori introdotti nell'acquisizione del dato si analizzano i parametri caratteristici interni di funzionamento, estratti mediante la calibrazione dello strumento.

Tale processo è possibile se il comportamento di tali parametri è definito da un modello matematico. La calibrazione di sensori passivi ha un elevato grado di precisione, mentre i sensori attivi non sono calibrabili se non con mezzo costosi e sofisticati.

Per cui, in questo secondo caso, è possibile definire i principali parametri di funzionamento del sistema attraverso un processo di caratterizzazione dello strumento, che permette di valutare le prestazioni del sistema di acquisizione 3D.

Caratterizzando lo strumento è possibile determinare la qualità del dato acquisito garantendo la riferibilità metrologica.

Per standardizzare il mercato si cerca di avere una norma di riferimento, in maniera tale da rendere confrontabili i risultati e gli strumenti di misura.

Per caratterizzare un sensore 3D si devono individuare i parametri che rappresentano le caratteristiche salienti di un sistema di acquisizione tridimensionale. Queste sono solitamente definite in una norma o presenti in letteratura.

Tra i principali parametri legati ai sensori 3D si trovano la risoluzione, l'accuratezza e la precisione (o incertezza di misura).

Risoluzione di un sensore 3D: è la massima capacità di ottenere i dettagli di una superficie e dipende dalle qualità ottiche, meccaniche ed elettroniche dello strumento.

Per uno scanner tridimensionale si distingue in risoluzione orizzontale e risoluzione in profondità, poiché i punti acquisiti sono disposti nello spazio tridimensionale e lo strumento può avere comportamento differente lungo le tre direzioni.

Risoluzione orizzontale: è la frequenza di campionamento spaziale dell'area inquadrata posizionata di fronte al sistema di acquisizione entro la profondità di campo.

Infatti convenzionalmente si definisce il piano orizzontale quello ortogonale all'asse ottico dello strumento. Pertanto si ha una risoluzione in x e una in y , che possono essere diverse e che altro non sono che la distanza tra celle adiacenti di acquisizione.

Supponiamo la lama di luce laser sia orientata lungo l'asse y e venga spostata lungo l'asse x . Lungo y la risoluzione è determinata dalla struttura del CCD, dalla lunghezza focale dell'ottica che rileva il profilo e dalla distanza tra camera e soggetto. (Figura 2-19)

La risoluzione lungo l'asse x , invece, dipende esclusivamente dallo spostamento meccanico della testa di scansione. (Figura 2-20)

Ad esempio, se il movimento è traslatorio, lo spostamento della lama di luce corrisponde all'entità della traslazione meccanica.

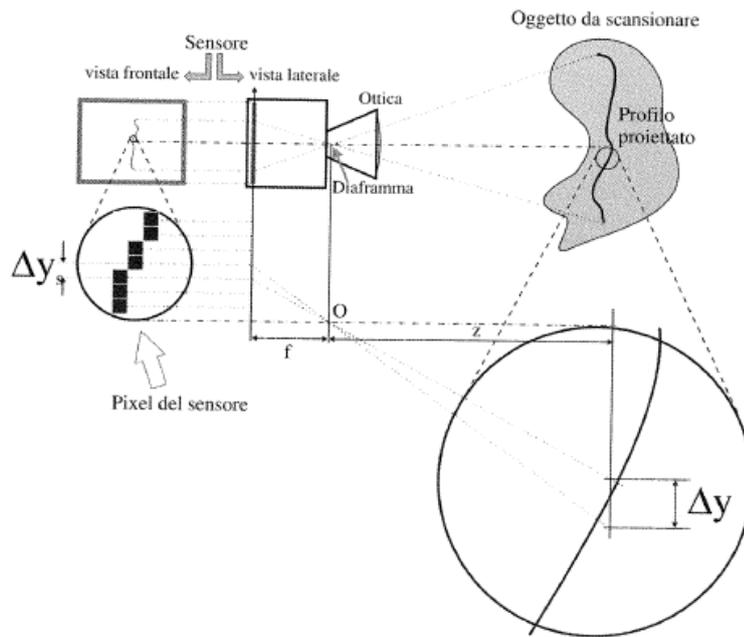


Figura 2-19 - Risoluzione lungo l'asse y di un sistema a lama di luce laser

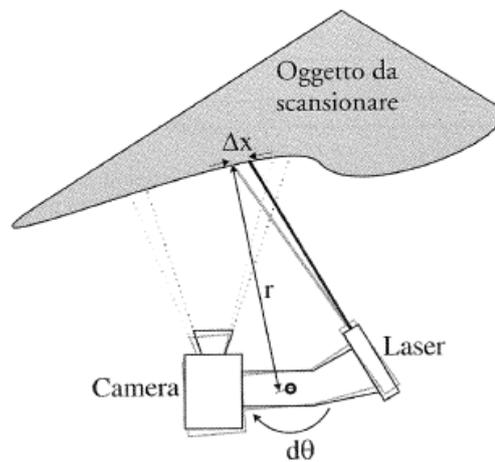


Figura 2-20 - Risoluzione lungo l'asse x di un sistema a lama di luce laser

Risoluzione in profondità: è lungo l'asse z ed è legata a quella nella direzione x.

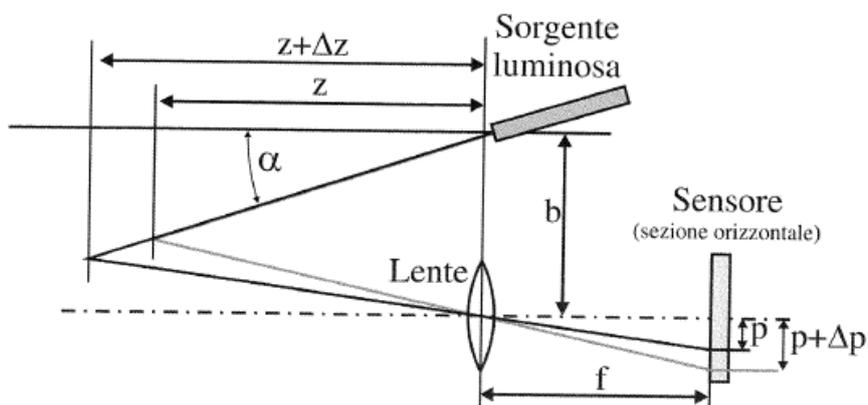


Figura 2-21 - Risoluzione lungo l'asse x di un sistema a lama di luce laser

Con riferimento alla Figura 2-21 si ricava che la risoluzione lungo z può essere espressa con la seguente relazione:

$$z = \frac{b}{\tan \alpha + \frac{p}{f}} \quad (1)$$

Per una piccola variazione di p, mediante il calcolo differenziale, si ricava l'entità della corrispondente variazione in z.

$$\Delta z = \frac{\partial z(p)}{\partial p} \cdot \Delta p$$

che si può scrivere come:

$$\frac{\partial z(p)}{\partial p} = \frac{\Delta z}{\Delta p} = \frac{0 \cdot (\tan \alpha + \frac{p}{f}) + b \cdot (0 + \frac{1}{f})}{(\tan \alpha + \frac{p}{f})^2} = \frac{-\frac{b}{f}}{(\tan \alpha + \frac{p}{f})^2}$$

dove, sostituendo con la (1) si ottiene:

$$\frac{\partial z(p)}{\partial p} = \frac{-\frac{b}{f}}{(\frac{b}{z})^2} = -\frac{z^2}{b \cdot f}$$

definita come magnificazione longitudinale.

$$\Delta z = -\frac{z^2}{b \cdot f} \Delta p$$

La risoluzione in z ha limitazioni differenti a seconda del principio di funzionamento del sensore. Nel caso di uno scanner laser a triangolazione queste limitazioni sono causate principalmente dalla natura coerente della luce laser.

La coerenza implica che la radiazione luminosa possa essere vista come un unico contributo di energia variabile sinusoidalmente piuttosto che come la somma di tanti contributi temporalmente scorrelati.

Inoltre l'incidenza di una radiazione luminosa su una superficie è influenzata dalla struttura del materiale che la compone.

Esso si comporta come un insieme di microspecchi che riflettono diverse parti dello stesso fascio laser da posizioni differenti, creando una somma di contributi nella luce riflessa. Tale somma determina un rinforzo dell'intensità luminosa, qualora i contributi siano in fase e una riduzione della stessa quando è presente uno sfasamento.

L'effetto che si ottiene è chiamato laser speckle, legato alla struttura del materiale.

Tale effetto limita le capacità di identificare esattamente lo spot laser sul sensore, introducendo una fonte di errore che si ripercuote sull'incertezza di misura in z.

2.4.2 Fonti di errore nella scansione laser

Una trattazione generale delle principali categorie dei parametri di influenza nel rilevamento di coordinate è rappresentata in Figura 2-22.

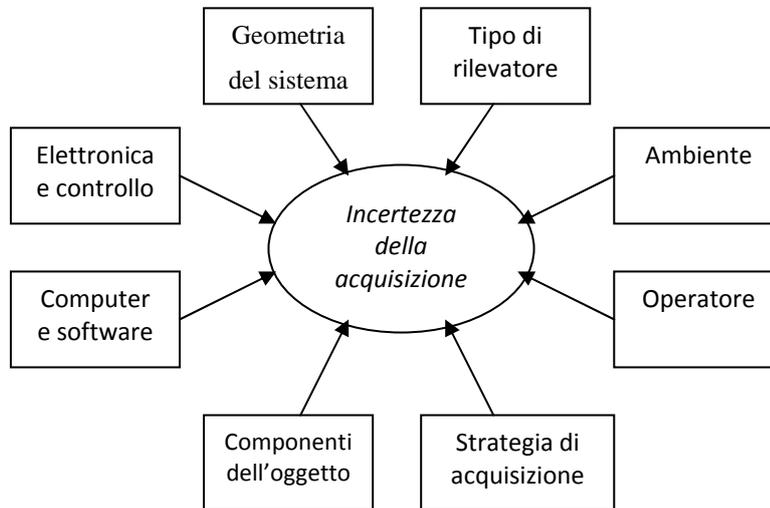


Figura 2-22 - Parametri di influenza nella acquisizione di coordinate.

Alcuni di questi parametri possono essere catalogati come parametri interni di influenza (geometria della macchina, tipo di rilevatore, elettronica e controllo, computer e software) ed altri come esterni (ambiente, elementi dell'oggetto da rilevare, operatore, strategia di acquisizione). Gli elementi dell'oggetto da rilevare e la strategia di acquisizione hanno un peso importante, visto che l'interazione tra la sonda ottica e l'oggetto è basata sulla tecnica senza contatto. Si è notato che il numero di questi parametri ha una certa consistenza e deriva da diverse nature. A questo proposito in Tabella 2-1 si riportano in maniera più dettagliata i parametri che influenzano una acquisizione, indicando anche la sorgente da cui derivano.

In particolare i parametri legati all'oggetto da scansionare sono molto importanti nel contesto di tale lavoro, poiché influenzano la scelta di un eventuale artefatto per la taratura del sistema ottico.

Riflettività del materiale: è la proprietà caratteristica adimensionale di un materiale di riflettere tutta l'energia incidente non assorbita e non trasmessa. La riflettività è il fattore di riflessione di un mezzo che ha una superficie riflettente e che è sufficientemente spesso da essere opaco e quindi non cambia fattore di assorbimento se aumenta di spessore. Si parla di riflettività spettrale quando ci si riferisce a un particolare intervallo di lunghezza d'onda dell'energia incidente.

Oggetto	Illuminazione	Ottica
Rugosità superficiale Ondulazione superficiale Incisioni e fenditure Morfologia della superficie Riflettività Curvatura ed inclinazione dell'oggetto Livello di pulitura superficiale Definizione degli spigoli	Tipo e direzione Intensità Colore Omogeneità e coerenza	Apertura Ingrandimento Pulizia della superficie ottica Distorsione dell'immagine (2D)
Sensori ottici ed elettronici	Elaborazione della procedura	
Allineamento del sensore riguardo agli assi dei sistemi di acquisizione e all'oggetto Dimensione dei pixel e rumore Errore di sincronizzazione Linearità, fattore di scala Stabilità a lunga durata	Messa a fuoco del profilo o della superficie Orientamento del profilo al sensore Algoritmi di approssimazione	

Tabella 2-1 - Parametri di influenza di un'acquisizione nel dettaglio

Traslucidità del materiale: Caratteristiche di traslucidità e micro-struttura cristallina distribuita in maniera non omogenea provocano un aumento dell'errore di misura.

Forma dell'oggetto: Gli strumenti di acquisizione tridimensionale non a contatto permettono di acquisire velocemente superfici che hanno un andamento libero nello spazio, mentre sono vincolati ad un passo di scansione prefissato che non permette loro di rilevare punti o spigoli di un oggetto.

Finitura superficiale: Essa può determinare variazioni considerevoli nella risposta del laser sulla superficie, poiché determina variazioni della luce che incide e riflette.

Colore superficiale: Esso è fondamentale per definire il livello di complessità di acquisizione. Si parte dal presupposto che il colore che meglio risponde è quello appartenente alla stessa banda dello spettro elettromagnetico del raggio laser. Ad esempio il rosso per la maggior parte degli strumenti a triangolazione, il verde per quelli a tempo di volo. Più ci si allontana dalla banda di colore, maggiore sarà l'interferenza con il raggio incidente e peggiore sarà la qualità dell'acquisizione tridimensionale. Inoltre agli estremi della banda luminosa ci sono il bianco e il nero: il bianco, dato dalla somma di tutti i colori, è quello che si presta meglio all'acquisizione del laser, mentre il nero è il peggiore, poiché assorbe completamente l'energia luminosa incidente.

Condizioni ambientali: La luminosità dell'ambiente, lo spazio di movimentazione degli strumenti e il tempo necessario per l'acquisizione sono alcuni dei fattori che risultano

determinanti non solo per la qualità del rilievo, ma anche per l'eventuale diminuzione o amplificazione delle problematiche legate all'oggetto.

Analisi del dato: Il software utilizzato per l'analisi e la gestione dei dati laser influenza notevolmente la qualità finale del modello tridimensionale. I programmi forniti con la strumentazione in genere si limitano alla gestione delle operazioni di scansione, trasformazione delle coordinate, esportazione in formati compatibili con altri applicativi e talvolta della registrazione in un unico sistema di riferimento di scansioni differenti.

Per un'analisi avanzata e per la generazione di modelli tridimensionali bisogna invece affidarsi ad applicativi legati al mondo del CAD e della modellazione tridimensionale (PolyWorks, I-Site, 3DVeritas, ecc.), ormai disponibili in numerosi pacchetti parzialmente o totalmente dedicati alla gestione di dati laser scanner.

Tutti questi software gestiscono l'elemento rilevato ricostruendolo digitalmente come una nuvola di punti. Da questa si possono estrarre numerose informazioni con accuratezze elevate :

- Metriche
- Angolari
- Volumetriche

Inoltre con la sovrapposizione di scansioni eseguite in tempi successivi si riesce a ricreare la variazione temporale con l'evidenziazione di spostamenti relativi.

Si possono inoltre ricostruire le superfici caratteristiche dell'oggetto studiato, sia affidandosi alla ricostruzione mediante semplici primitive sia applicando la più avanzata modellazione 3D NURBS (Non Uniform Rational B-Splines).

Velocità di acquisizione

Un altro parametro che può incidere in maniera decisiva in un progetto di scansione è la velocità di acquisizione.

Per sistemi a triangolazione questa può essere estremamente spinta: si può arrivare a velocità di acquisizione superiori a 200.000 punti al secondo con risoluzioni variabili dal millimetro al decimo di millimetro.

Nei sistemi a lama di luce in cui si effettua un movimento meccanico la velocità di acquisizione può scendere della metà.

Nel caso di sistemi a tempo di volo i tempi sono più lunghi e l'acquisizione va da qualche punto al secondo a qualche migliaio di punti al secondo.

Modalità di acquisizione

La modalità con cui effettuare un'acquisizione tridimensionale può variare a seconda dei casi. Essa dipende dalla complessità dell'oggetto da misurare e dalla finalità del modello che si vuole acquisire, ossia se è sufficiente creare una rappresentazione virtuale dell'oggetto con una sommaria approssimazione o se è necessario avere una rigorosa corrispondenza metrica tra oggetto fisico ed oggetto virtuale (ad esempio una verifica dimensionale)

Nel caso di sensori attivi la luce necessaria alla ripresa è fornita dal sensore stesso e la variazione dell'illuminazione dell'ambiente può, entro certi limiti, essere ignorata. Se questa supera determinate soglie è invece possibile che la misura venga inficiata, pertanto si deve provvedere a ridurre l'intensità.

Se l'ambiente è con illuminazione artificiale si deve controllare si ottenga un risultato accettabile.

Filtraggio

Filtrare un dato significa modificare intrinsecamente le informazioni legate ad ogni singolo punto, agendo sulle coordinate spaziali o sull'informazione cromatica.

In via teorica un dato tridimensionale non dovrebbe mai essere filtrato, poiché questo significherebbe che la scelta dello strumento adottato per il rilievo non è coerente con le caratteristiche geometriche e fisiche del modello fisico analizzato.

Per un laser scanner il filtraggio dei dati può riguardare due aspetti principali: da un lato l'eliminazione degli elementi estranei alla geometria rilevata, dall'altro la modifica dei dati affetti da un errore incompatibile con le caratteristiche geometriche del modello fisico.

Altri fattori esterni, come per esempio la temperatura, le vibrazioni e l'umidità, i quali possono invalidare i dati raccolti pregiudicando l'accuratezza delle misurazioni effettuate con sistemi contatto, risultano ininfluenti nelle tecniche senza contatto.

2.4.3 Incertezza in un sistema a triangolazione

La metrologia è la disciplina che studia, con gli strumenti della statistica, le variazioni di un valore misurato rispetto alla grandezza reale. Infatti quando si opera una misura, ciò che viene misurato non corrisponde esattamente al dato vero, ma ne rappresenta sempre un'approssimazione.

La fluttuazione di una misura si compone di una parte sistematica e di una parte casuale. La prima dovuta al sussistere di una condizione di lavoro dello strumento di misura diversa da quella prevista teoricamente, la seconda originata da possibili variazioni aleatorie di alcuni parametri che intervengono nel processo di misurazione.

In particolare una variabile aleatoria è una quantità che varia in maniera non prevedibile con esattezza. La sua variazione può essere associata, per esempio, al passare del tempo, ad un'azione che viene ripetuta, alla variazione della temperatura.

La parte dell'errore causato da motivi sistematici è definita accuratezza, che può essere resa elevata minimizzando lo scarto medio rispetto al valore vero, con un processo di taratura.

Si definisce, invece, incertezza di misura quella parte dell'errore ascrivibile a variazioni aleatorie e per questo non correggibili con un processo di taratura.

Poiché per sua natura la grandezza aleatoria non è misurabile, la sola operazione che si può condurre per averne comunque una caratterizzazione è uno studio teorico che ne descriva la variabilità tra misure diverse.

In un sistema di rilievo 3D questi aspetti sono fondamentali, perché consentono di utilizzare uno strumento in maniera appropriata rispetto al tipo di lavoro che deve essere svolto.

Se si dispone di uno scanner 3D occorre aver sempre piena consapevolezza di tali parametri per ottimizzarli rispetto all'applicazione, dato che le condizioni d'uso alterano precisione e accuratezza.

I metodi che permettono di avere una stima delle prestazioni di uno strumento per l'acquisizione 3D, ossia dell'accuratezza e della precisione sono principalmente due:

- la stima a priori, ossia le funzioni che rappresentano i legami tra variabili indipendenti (perturbabili) e variabile dipendente (perturbata) sono studiate con la teoria della variabile aleatoria. In questo modo si ottiene una previsione teorica della deviazione standard della variabile dipendente rispetto alle deviazioni standard di quelle indipendenti.
- la stima a posteriori, cioè un set (discreto) di dati originati da un sensore con determinate caratteristiche sono analizzati statisticamente generando una media, una deviazione standard e un istogramma che rappresentano il comportamento della variabile aleatoria corrispondente.

L'incertezza a priori in un sistema a triangolazione viene definita, con riferimento alla Figura 2-5, come varianza di misura in z mediante la formula:

$$\sigma_z^2 \approx \left(\frac{z^2}{b \cdot f} \right)^2 \cdot \sigma_p^2 + \left(\frac{z}{\cos(\alpha)^2} \right)^2 \cdot \sigma_\alpha^2$$

Ricordando che

$$z = \frac{b}{\tan \alpha + \frac{p}{f}} \quad \text{e} \quad x = z \cdot \tan \alpha$$

Conoscere l'incertezza a priori permette di:

- stimare in fase di calibrazione dello strumento σ_p e σ_α , e questo consente di prevedere quale sarà la prestazione sul dato misurato ad una distanza determinata;
- consentire, su alcune range camera, di variare il setup opto-geometrico, ossia i legami tra distanza, baseline e deviazione;
- decidere in fase di pianificazione di una scansione altri parametri come ad esempio la distanza di lavoro, necessaria per progettare una scansione senza uscire dalle specifiche.

In particolare l'incertezza σ_p , è limitata da

- lo speckle del Laser. Esso è il risultato della proiezione di un raggio laser coerente su una superficie con rugosità simili a λ , quindi è il risultato della somma dei segnali prodotti dalla micro-struttura giacente su questa superficie.
- il rumore di natura elettrica nel canale di lettura del sensore di posizione
- la forma dei pixel sul sensore
- il contrasto, influenzato dalla luce dell'ambiente, dalla potenza luminosa inviata sul soggetto e dall'inclinazione della superficie

Con particolare riferimento alla tipologia di strumenti che adottano una lama di luce laser, si può affermare che:

- c'è indipendenza tra il campo inquadrato e la precisione della misura di z
- hanno una risoluzione (xy) con profondità di campo elevata
- sono immuni alla luce ambiente.

2.5 Normativa di riferimento per sistemi ottici

I sistemi ottici, nel panorama industriale odierno, ricoprono il luogo di strumenti di misura, pertanto un simile impiego rende necessaria la presenza di norme che definiscano il regolamentino i criteri per la valutazione di accuratezza e verifica periodica di tali strumenti.

Negli ultimi anni si sono formati alcuni gruppi a livello internazionale per la definizione degli standard nel campo per il rilievo 3D, che riguardano l'insieme delle tecnologie e dei metodi che permettono di trasformare un oggetto fisico in un artefatto digitale.

In assenza di standard internazionali che regolamentano in maniera specifica le prove di accettazione e di verifica periodica degli strumenti ottici di misura tridimensionali l'unico riferimento normativo internazionale è la UNI EN ISO 10360.

Tale norma regola la verifica delle prestazioni e l'assicurazione della qualità nel settore delle macchine di misura a coordinate (CMM) ed è articolata in 6 parti definitive e una parte ancora in lavorazione che tratta appunto sistemi di misura non a contatto.

In generale la norma ISO 10360 specifica i test di accettabilità confrontando le prestazioni di una CMM quando questa viene utilizzata per stimare una lunghezza di riferimento, rispetto a quanto definito dal produttore.

La sezione ISO 10360-8, in particolare, specifica i test di accettabilità verificando le prestazioni di una CMM cartesiana equipaggiata con sensori ottici di distanza.

Tuttavia il lavoro che riguarda la parte 8 è in fase preliminare e la pubblicazione di una norma che regoli il settore ottico è prevista solo nel lungo periodo.

Ma in mancanza di altre norme scritte esplicitamente per i sistemi di misura non a contatto la ISO 10360-2 è l'unico riferimento internazionale per la verifica delle prestazioni dei sistemi di misura tridimensionali.

Specificatamente per i sistemi ottici in ambito ISO è chiaro che quest'area in così forte sviluppo tecnologico non può essere ignorata. Per tale ragione il gruppo di lavoro ISO che si occupa di CMM (ISO/TC 213/WG10) ha deciso di avviare lo studio per una nuova norma che prenderà il nome di ISO 10360-7 e tratterà CMM che integrano sistemi di misura non a contatto.

Negli Stati Uniti è nata una commissione per gli standard E57, nominata dalla American Society for Testing and Material (ASTM) con il compito di lavorare sulla definizione di standard per le specifiche dei sistemi di acquisizione 3D e la valutazione di questi strumenti nei vari ambiti di impiego (costruzioni, manifatturiero, rilevamento, conservazione,...).

Sempre negli USA è attivo il gruppo di ricerca al National Institute of Standard and Technology (NIST) nell'ambito della valutazione delle prestazioni degli strumenti, in particolare dei laser scanner long range.

Norme e linee guida nazionali sui sensori ottici

- La guida americana ANSI/ASME B89.4.19 sui metodi per la verifica di prestazioni di CMM equipaggiate con sensori ottici. **ASME B89.4.19-2006, Performance Evaluation of Laser-Based Spherical Coordinate Measurement Systems** — È la prima norma che

tratta il laser tracker e sistemi analoghi. Il documento contiene tutte le informazioni necessarie per specificare e verificare le prestazioni del laser tracker con l'aggiunta di informazioni per valutare le fonti di incertezza di questi strumenti.

- La guida tedesca VDI/VDE 2617 parte 6, 6.1, 6.2 che trattano l'accuratezza di CMM con sensori ottici
- La guida tedesca VDI/VDE 2634 Parte 2, che tratta i sistemi ottici 3D per la misura di superfici con modalità punto-punto e in scansione, nel caso specifico di una singola vista di acquisizione
- La norma tedesca DIN 32877:2000 "Optoelectronic measurement of form, profile and distances" che riguarda specificatamente i sensori ottici per le misure geometrico-dimensionali
- La ISO/DIS 10360-7 "Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) -- Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems"

2.5.1 La norma VDI/VDE 2617 part 6

Come anticipato nel campo dei sistemi di acquisizione ottici non esistono degli standard internazionali. La linea guida tedesca VDI/VDE 2617 si occupa di sistemi di acquisizione ottici nella sezione 6 e 6.1. Altri aspetti importanti delle macchine di misura a coordinate sono riportati nelle sezioni riguardanti i metodi di prova delle sonde ottiche usati nei sistemi di acquisizione.

La VDI/VDE 2617 parte 6.1 può essere vista come implementazione delle procedure di verifica per sonde ottiche 2D.

La VDI/VDE 2617 parte 6 è una descrizione generale sui test di validazione e verifica di rendimento dei sistemi di acquisizione equipaggiati con un sensore ottico. Nei test di validazione, si devono passare due verifiche: una per determinare l'incertezza della sonda, ed una per determinare l'incertezza sulla lunghezza acquisita. Si è visto che questo modo di procedere, per questo tipo di problema, è strettamente legato ai test eseguiti per i sistemi di acquisizione meccanici, il tutto descritto nella sezione 2 e 3 della stessa guida.

L'incertezza di acquisizione è valutata eseguendo dei test per le sonde 1D e 2D utilizzando oggetti mono, bi e tridimensionali (ad esempio sfere, anelli, strutture al cromo). Alcuni esempi di questi test sono rappresentati in Figura 2-23. I sistemi di acquisizione e la sonda devono rispondere alle specifiche del produttore per essere utilizzabili.

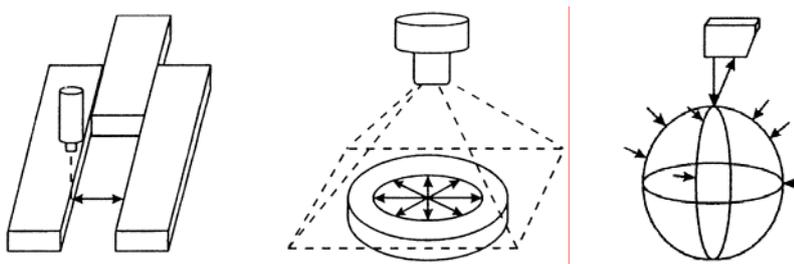


Figura 2-23 - Esempi di test per l'incertezza di rilevamento per differenti tipi di ottiche.

L'incertezza sulla lunghezza di acquisizione è verificata nello stesso modo dei sistemi di acquisizione meccanici, cioè utilizzando dei blocchetti di riscontro. Gli oggetti usati per la calibrazione di questi strumenti sono utilizzabili, principalmente, per verificarne le prestazioni ed eseguirne le verifiche di utilizzo. Inoltre, gli artefatti sono tutti basati su strutture al cromo (*chromium structures*) poste su vetro od oggetti bidimensionali. Tra le misure eseguite sui vari blocchetti di riscontro, si riporta in Figura 2-24 l'esempio del metodo di acquisizione effettuato su una barretta di vetro che presenta delle tracce al cromo (*glass scale*).

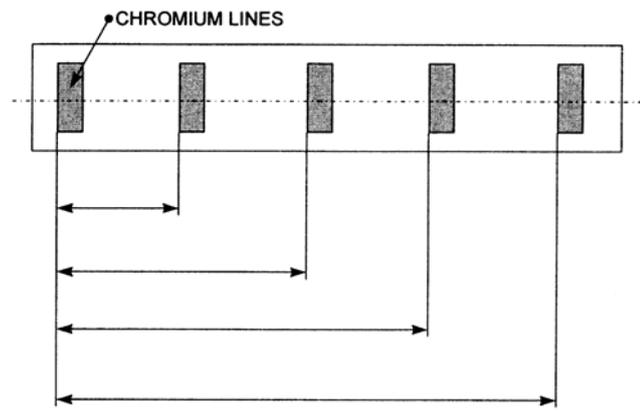


Figura 2-24 - Esempio di schema e strategia di acquisizione di un provino di vetro graduato.

La VDI/VDE 2617 parte 6.1 tratta specificatamente i sensori ottici 2D e riporta una dettagliata descrizione delle funzioni e dei più importanti parametri d'influenza per i vari tipi di sensori. I test specifici eseguiti per analizzare l'incertezza del rilevamento richiedono specificatamente delle acquisizioni sia unidirezionali che bidirezionali. Questa linea guida è un utile strumento per le sonde utilizzate sui sistemi di acquisizione ottici.

La procedura per i test di accertamento delle prestazioni di una sonda ottica è molto importante per chi utilizza sistemi di acquisizione a non contatto. Sono state esaminate entrambe le prove 1D e 2D, e dai risultati ottenuti, sono stati costruiti modelli matematici. La procedura dei test risultanti dagli studi riportati nella sezione successiva risultano più esaurienti di quelli descritti nella VDI/VDE 2617. Tuttavia questi test dovrebbero essere svolti da ogni utilizzatore, in maniera tale di poter essere a conoscenza delle prestazioni reali della propria macchina. Come nel caso di sistemi di acquisizione meccanici, la ripetibilità, nel senso stretto della definizione, non è ottenuta dall'applicazione dei metodi della linea guida tedesca. Per ottenere i risultati di ripetibilità si deve utilizzare un insieme di prove con compito specifico.

2.5.2 La norma VDI/VDE 2634 Part 2

Nell'ambito normativo nazionale, nell'organizzazione tecnico-scientifica tedesca, la norma VDI/VDE 2634 Part 2 rappresenta l'unica linea guida redatta specificatamente a regolamentare la validazione di un sistema di visione per il rilievo di forme tridimensionali,

definendo la procedura e i campioni per la verifica di prestazioni di sistemi ottici di misura tridimensionale a scansione d'area.

E' disponibile la versione in lingua tedesca, che costituisce il riferimento, e la versione in lingua inglese, traduzione della versione originale.

Infatti l'obiettivo di tale norma dal titolo "Optische 3D-Messsysteme Bildgebende Systeme mit flachenhafter Antastung" (Sistemi ottici di misura 3D - Sistemi ottici a scansione d'area) è quello di individuare una procedura per valutare la precisione e l'accuratezza di digitalizzazione dei sistemi di visione stereo per il rilievo di forme tridimensionali, definiti in essa "sistemi ottici tridimensionali di misura per immagini che realizzano scansioni di superfici, il cui funzionamento è basato sulla triangolazione".

In particolare tale linea guida si rivolge ai sistemi ottici di misura 3D a scansione d'area che adottano il principio della triangolazione ed è applicata con riferimento ad un'unica vista/acquisizione dell'oggetto 3D. Ossia tale norma non si rivolge a quelle applicazioni che sono combinate con una tavola rotante o che utilizzano un riposizionamento dello strumento realizzando l'operazione di matching attraverso riferimenti esterni (markers) o algoritmi di best fitting.

Concretamente la VDI/VDE 2634 Part 2 definisce sia un "metodo di accettazione" che un "metodo di riverifica" relativi al sistema stereo visivo in esame. Per metodo di accettazione si intende la procedura con cui si valuta la precisione di ricostruzione del sistema stereo visivo, mentre per metodo di riverifica si intende la procedura che assicura il mantenimento temporale della precisione di cui risulta accreditato il sistema stereo visivo.

Nella VDI/VDE 2634 Part 2 innanzitutto viene esposta una differenza tra quelle che vengono definite come modalità operative e quelle che vengono definite come condizioni operative: le prime comprendono tutti i parametri che caratterizzano la configurazione del sistema stereovisivo, mentre le seconde comprendono tutti i parametri che caratterizzano l'ambiente in cui viene eseguita la misura.

Nella stessa norma, come esempi di modalità operative vengono citati i seguenti: tipo ed intensità di illuminazione, volume di misura, tipo, numero e disposizione dei sensori ottici presenti nel sistema stereo e tipologia e durata del processo di acquisizione delle immagini e del processo di elaborazione delle medesime da parte del sistema stereo. Vengono invece considerate come condizioni operative: la temperatura e il gradiente della stessa, nell'ambiente in cui si effettuano le misure; il suo tasso d'umidità; la presenza di eventuali vibrazioni ed interferenze elettromagnetiche in esso; l'eventuale presenza di polvere e le condizioni d'illuminazione dell'ambiente suddetto.

I parametri di qualità espressi dalla linea guida sono, analogamente a quelli descritti nella ISO 10360, il probing error (errore di tastatura) e lo sphere spacing error (errore di distanza di sfere o errore di spaziatura delle sfere) e il flatness measurement (errore di planarità) e verranno definiti nel dettaglio nel seguito della trattazione.

La conoscenza di tali parametri, associati allo strumento di misura, consentirà di caratterizzare lo stesso allo scopo di poterlo comparare con altri sistemi.

Il test di accettazione e di verifica periodica è realizzato attraverso la misura di artefatti calibrati.

La norma prevede la definizione di due provini che sono rappresentati schematicamente in Figura 2-25.

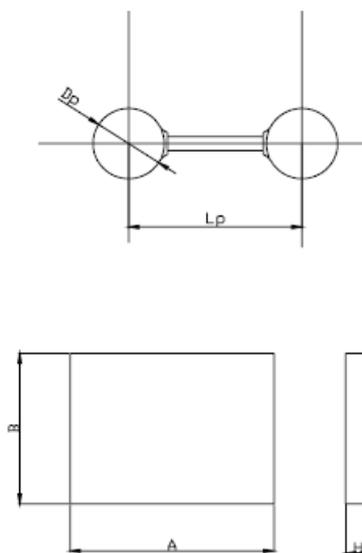


Figura 2-25 - Provini previsti dalla Norma VDI/VDE 2634 Part 2

I due provini devono essere realizzati seguendo le specifiche dettate dalla norma stessa, illustrate di seguito. Un provino deve essere costituito da due sfere collegate mediante un'asta e, nel prosieguo, verrà denominato "manubrio", mentre l'altro deve avere la forma di un semplice parallelepipedo a base rettangolare. Entrambi i provini, però, devono necessariamente essere muniti di un certificato di calibrazione rilasciato da un laboratorio preposto a tale scopo; si coglie l'occasione per ricordare che in Italia, i laboratori che hanno la facoltà di rilasciare dei certificati di questo tipo sono solo quei laboratori di taratura accreditati dal SIT (Sistema di Taratura in Italia).

I due provini sono accomunati anche dall'essere realizzati con il medesimo materiale (ceramica o acciaio), perché per entrambi vi è l'esigenza di dover consentire un'agevole acquisizione al sistema stereovisivo; infatti, nella VDI/VDE 2634 Part 2, è espressamente raccomandato che i provini non devono dar luogo ad alcun problema di riflessività durante la loro acquisizione.

La norma prevede la definizione del diametro delle sfere D_p e della distanza tra i loro centri L_p . In particolare D_p ed L_p sono entrambi definiti in funzione del parametro L_0 , che rappresenta la lunghezza della diagonale del più piccolo parallelepipedo contenente il volume di misura del sistema stereo considerato.

Le relazioni che definiscono sia D_p che L_p in funzione di L_0 sono:

$$L_p \geq 0,3 \times L_0$$

$$D_p = (0,1 \div 0,2) \times L_0$$

Invece, per quel che riguarda il secondo provino, anch'esso rappresentato nella Figura 2-25, si ha quanto segue: la sua altezza H può assumere un valore qualunque (compatibilmente con le dimensioni del volume di misura), mentre la larghezza B e la lunghezza A sono definite dalle relazioni seguenti:

$B \geq 50 \text{ mm}$

$A \geq 0,5 \times L_0$

Gli artefatti, definiti da tali dimensioni, vengono utilizzati per la valutazione dei parametri di qualità che, come già anticipato, consentono di valutare la precisione del sistema di misura esaminato e danno la possibilità di confrontare tra loro diversi sistemi stereo operanti nelle medesime condizioni.

Per ciascun provino si hanno inoltre le seguenti prescrizioni: le sfere del manubrio devono avere un errore di forma (ovvero, un errore di sfericità) non superiore ad un quinto del parametro di qualità R; inoltre, l'errore appena definito, la distanza tra i centri delle stesse sfere ed i loro raggi devono essere noti con un'incertezza non superiore ad un quinto del parametro di qualità SD; infine, il provino a forma di parallelepipedo deve avere un errore di forma della superficie su cui si valuta l'errore nelle misure di planarità (cioè, un errore di planarità relativo a tale superficie) non superiore ad un quinto del parametro di qualità R_E .

Tali parametri sono i seguenti:

I) L'errore di tastatura R

Questo parametro descrive l'errore caratteristico del sistema ottico all'interno di una piccola parte del volume di misura.

Le fonti di errore associate ad esso sono: la risoluzione laterale, errori di digitalizzazione, errori nella misura della fase ed errori nella misura delle coordinate dell'immagine e dei pixel.

La procedura di misura prevede si realizzano dieci acquisizioni di una delle due sfere del manubrio con il sistema stereovisivo, disponendo la sfera in dieci posizioni diverse, arbitrarie ed uniformemente distribuite all'interno del volume di misura. Per ogni acquisizione/posizione si calcola la sfera di best fit secondo il metodo dei minimi quadrati (Gauss), partendo dalla nuvola di punti rappresentativa della sfera e per ciascuna di esse viene determinata la deviazione radiale, dei punti rilevati, dalla sfera di best fit. Infine si determinano i valori di R che rappresentano la somma dei valori assoluti degli scostamenti massimi dalla sfera di best fit dei punti della nuvola.

Nell'elaborazione dei risultati è consentito trascurare non più dei 3 per 1000 dei punti misurati per posizione.

II) L'errore di spaziatura delle sfere SD

Questo parametro serve a verificare la capacità dello strumento nelle misure di lunghezza e a garantire la tracciabilità. Esso rappresenta la differenza tra il valore misurato e il valore nominale relativo alla distanza tra i centri delle due sfere che costituiscono l'artefatto.

Gli artefatti utilizzati in questa prova sono le stesse ball bar previste per l'errore di tastatura.

Per valutare l'errore di spaziatura si devono effettuare le misurazioni delle ball bar nel volume di lavoro.

La norma raccomanda la disposizione esatta delle sette posizioni del manubrio in tale volume; esse sono descritte qui di seguito e illustrate nella Figura 2-26.

Dalla figura si evince subito che tre posizioni del manubrio devono essere parallele alle tre dimensioni del parallelepipedo rappresentante il volume di misura (sono le posizioni

indicate con 1, 2 e 3 nella stessa Figura 2-26); altre tre posizioni devono essere invece coincidenti con le diagonali di tre facce del parallelepipedo: la faccia anteriore, che è la prima superficie del parallelepipedo incrociata dalla luce emessa dal proiettore del sistema stereo (cioè la superficie ABEF di Figura 2-26), la faccia posteriore e una delle facce laterali (sono le posizioni indicate con 4, 5 e 6 in Figura 2-26). Infine il manubrio deve essere posizionato lungo una delle diagonali interne del parallelepipedo (è la posizione indicata con 7 nella Figura 2-26).

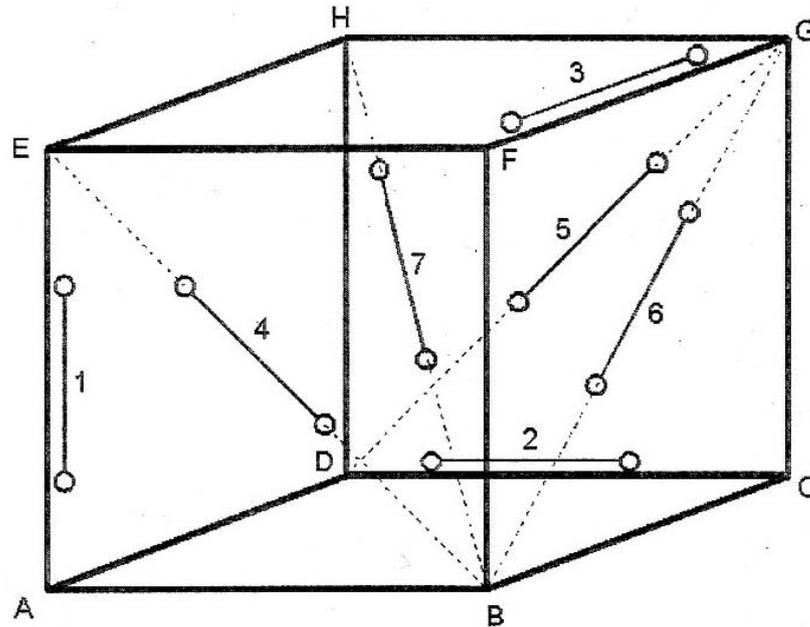


Figura 2-26 - Posizioni in cui deve essere acquisito il manubrio

Successivamente, per ognuna delle posizioni considerate, partendo dalla nuvola di punti rappresentante l'intero manubrio, vengono definite le due sfere di best-fit rappresentanti le sfere del manubrio stesso.

In questo caso le sfere di best fit, pur essendo determinate ancora secondo il metodo dei minimi quadrati, hanno un raggio imposto pari al valore del raggio risultante dal certificato di calibrazione del manubrio. Nel calcolo dell'errore di tastatura invece il raggio era quello ottenuto dalla sfera di best fit. Fra queste due situazioni vi è una differenza sostanziale, che viene immediatamente esposta. Infatti il calcolo di una sfera di best-fit con raggio imposto consiste nella definizione della posizione della sfera stessa che meglio approssima i punti di una data nuvola, secondo il metodo dei minimi quadrati; tuttavia, essendo fisso il suo raggio, definire la posizione della sfera non vuol dir altro che definire la posizione del centro della medesima. La questione è del tutto differente quando bisogna calcolare la sfera di best-fit con raggio libero che approssima i punti di una data nuvola perché, in tal caso, anche il suo raggio viene definito mediante il metodo dei minimi quadrati.

Una volta definiti i centri delle due sfere di best-fit a raggio imposto, per ciascuna delle nuvole rappresentanti il manubrio, si misura la distanza tra i due centri indicandola con l_m e poi si definisce l'errore di spaziatura delle sfere Δl come segue

$$\Delta l = l_m - l_k$$

Il termine l_k rappresenta il valore della distanza tra i centri delle sfere del manubrio rilevato dal suo certificato di calibrazione. A questo punto bisogna precisare che tra SD e Δl esiste una differenza di ruoli: SD rappresenta il limite massimo ammissibile per l'errore di spaziatura delle sfere, mentre Δl rappresenta l'errore di spaziatura delle sfere calcolato per una certa acquisizione, dunque tutti i valori di Δl devono risultare inferiori al valore di soglia SD (analogamente a quanto si era visto, quando si è trattato l'errore di tastatura R). Infine, anche per il parametro di qualità SD la VDI/VDE 2634 Part 2 prevede che possa essere scartato il tre per mille dei punti di ogni nuvola. Analogamente a quanto visto per R, si procede scartando quei punti di ogni nuvola che hanno il valore maggiore di Δl , il cui numero esatto varia da nuvola a nuvola in relazione alla quantità di punti che costituiscono la nuvola stessa. Va però sottolineato che, qualora non venga precisata la configurazione del sistema stereovisivo in cui realizzare le sette acquisizioni dedicate alla misura del parametro di qualità considerato (cioè la modalità operativa adottata per eseguirle), la norma consente che si effettuino le stesse in tutte le possibili configurazioni del sistema medesimo.

III) L'errore nelle misure di planarità R_E

L'ultimo parametro di qualità definito dalla direttiva in esame è l'errore nelle misure di planarità R_E (che in essa viene anche indicato come parametro di qualità opzionale).

Il provino è a forma di parallelepipedo e prevede che vengano realizzate sei acquisizioni dello stesso. In queste acquisizioni il parallelepipedo dev'essere disposto in sei posizioni differenti che sono raccomandate all'interno della stessa norma VDI/VDE 2634 Part 2 ed illustrate nella Figura 2-27. Si osserva che l'asse Z del sistema di riferimento riportato in questa figura è parallelo alla direzione d'incidenza del proiettore del sistema stereo, cioè alla sua direzione di emissione della luce.

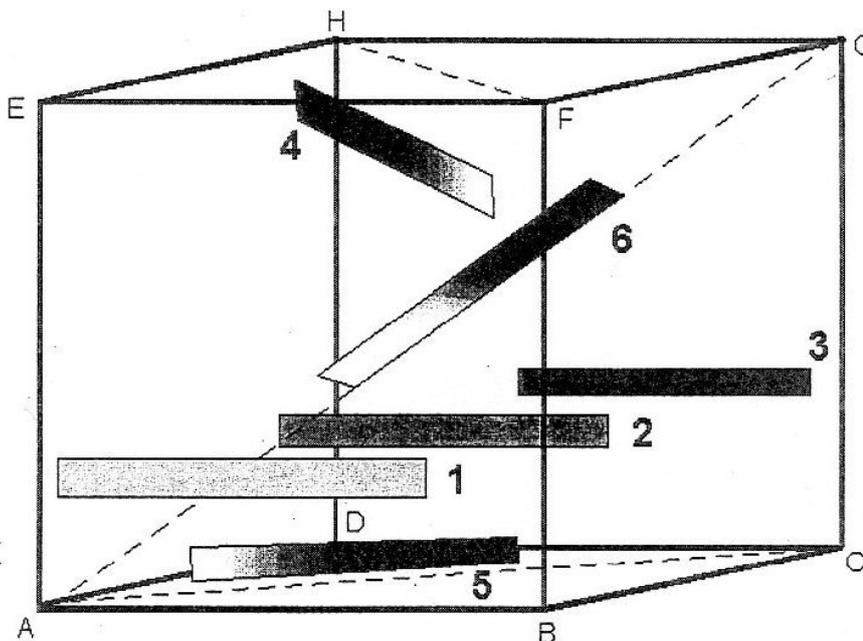


Figura 2-27 - Posizioni in cui deve essere acquisito il piano

Le prime tre posizioni prevedono che il provino sia disposto in corrispondenza della faccia anteriore, del centro e della faccia posteriore del volume di misura, anch'esso a forma di parallelepipedo, come si è visto prima (sono le posizioni 1, 2 e 3 nella Figura 2-27). Altre due posizioni prevedono che il provino sia disposto lungo una diagonale della base superiore e lungo una diagonale della base inferiore del volume di misura (sono le posizioni 4 e 5 nella Figura 2-27). Infine il provino deve essere disposto lungo una delle diagonali interne del volume di misura (è la posizione 6 in Figura 2-27).

Anche in questo caso qualora non venga precisata la configurazione del sistema stereovisivo in cui realizzare le sei acquisizioni appena descritte, cioè la modalità operativa adottata per eseguirle, la norma consente che si effettuino le stesse in tutte le possibili configurazioni del sistema.

Dopo aver realizzato le sei acquisizioni appena descritte si definisce, mediante il metodo dei minimi quadrati, il piano di best fit per ciascuna delle nuvole di punti ottenute e poi si rilevano gli scostamenti dei punti di ogni nuvola dal relativo piano di best fit.

Si può allora definire anche l'errore nelle misure di planarità R_E di ognuna delle nuvole di punti, la quale rappresenta il provino in una certa posizione. Si avrà che R_E è pari alla somma dello scostamento positivo massimo e del valore assoluto dello scostamento negativo massimo, calcolati entrambi rispetto al piano di best fit della nuvola considerata. Anche nel calcolo del parametro di qualità R_E la norma raccomanda di scartare sempre il tre per mille dei punti di ogni nuvola acquisita. Quindi verranno messi da parte quei punti per cui risulta maggiore il valore assoluto del parametro di qualità in esame e cioè quei punti della nuvola per cui risulta massima la somma di scostamenti appena descritta.

Anche R_E è un parametro di qualità e dunque per esso vale quanto visto sia per R che per SD , ovvero lo si deve considerare come il limite massimo ammissibile dell'errore nelle misure di planarità. Questo significa che l'errore medesimo calcolato in tutte le acquisizioni realizzate, o meglio per la nuvola di punti rappresentante ognuna di esse, deve risultare minore del limite rappresentato da R_E .

Per concludere si espongono le circostanze in cui, secondo la norma VDI/VDE 2634 Part 2, la prova di accettazione fallisce:

I) Se in una sola delle dieci acquisizioni della sfera del manubrio (realizzate per valutare l'errore di tastatura), il valore dell'errore di tastatura che viene determinato è superiore al parametro di qualità R , che rappresenta il massimo limite ammissibile per l'errore stesso, allora, l'acquisizione deve essere ripetuta un'altra volta (nella medesima posizione in cui era stata realizzata precedentemente) e deve essere determinato il valore dell'errore di tastatura, relativo alla nuova acquisizione. Se anche il nuovo valore dell'errore di tastatura è superiore al parametro di qualità R allora la prova di accettazione è fallita. Invece, se il nuovo valore dell'errore di tastatura è inferiore, esso si può considerare il massimo valore dell'errore di tastatura di cui è accreditato il sistema di visione stereo in esame.

II) Se in una sola delle sette acquisizioni del manubrio (realizzate per valutare l'errore di spaziatura delle sfere) il valore dell'errore di spaziatura delle sfere ΔI è superiore al parametro di qualità SD , che rappresenta il massimo limite ammissibile per l'errore stesso, allora, l'acquisizione deve essere ripetuta un'altra volta (nella medesima posizione in cui era stata realizzata precedentemente) e deve essere determinato il valore dell'errore di spaziatura delle sfere ΔI , relativo alla nuova acquisizione; se anche il nuovo valore di ΔI è

superiore al parametro di qualità SD, allora, la prova di accettazione è fallita. Invece, se il nuovo valore di ΔI non è maggiore di SD, la prova di accettazione è riuscita, ed SD si può considerare il massimo valore dell'errore di spaziatura delle sfere di cui è accreditato il sistema di visione stereo in esame.

III) Se in una sola delle sei acquisizioni del provino a forma di parallelepipedo (realizzate per valutare l'errore nelle misure di planarità), il valore dell'errore nelle misure di planarità che viene determinato è superiore al parametro di qualità R_E , che rappresenta il massimo limite ammissibile per l'errore stesso, allora, l'acquisizione deve essere ripetuta un'altra volta (nella medesima posizione in cui era stata realizzata precedentemente) e deve essere determinato il valore dell'errore nelle misure di planarità, relativo alla nuova acquisizione; se anche il nuovo valore dell'errore nelle misure di planarità è superiore al parametro di qualità R_E , allora, la prova di accettazione è fallita. Invece, se il nuovo valore dell'errore nelle misure di planarità non è maggiore di R_E , la prova di accettazione è riuscita, ed R_E si può considerare il massimo valore dell'errore nelle misure di planarità di cui è accreditato il sistema di visione stereo in esame.

Pur essendo superfluo, si vuole comunque precisare che se si dovessero verificare contemporaneamente due qualsiasi, oppure tutte le tre circostanze sopra menzionate, la prova di accettazione finirebbe ugualmente per fallire.

Infine si fa notare che, secondo la norma VDI/VDE 2634 Part 2, i valori dei parametri di qualità R, SD ed R_E , che s'impiegano nella prova di accettazione (prima indicati come i limiti massimi ammissibili per ciascuno degli errori considerati), devono essere definiti dalla stessa azienda produttrice del sistema stereovisivo in prova.

Si ricorda che la VDI/VDE 2634 Part 2 definisce un'acquisizione come il "singolo elementare passo di misura", ovvero come la "vista singola", che serve per misurare un oggetto tridimensionale, senza che venga modificata né la configurazione del digitalizzatore (cioè le posizioni relative dei suoi componenti), né la posizione relativa tra il digitalizzatore e l'oggetto medesimo.

Questa precisazione è molto importante poiché quando si vuole digitalizzare un oggetto tridimensionale con un sistema di visione non basta una sola acquisizione dello stesso, ma bisogna realizzarne diverse (variando di volta in volta "la posizione relativa digitalizzatore-oggetto") e poi "allineare" tra loro le singole nuvole di punti ottenute (una nuvola per ogni acquisizione), perché solo così si riesce ad ottenere la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto in esame.

2.6 Conclusioni

La digitalizzazione laser, comparandola con il metodo che utilizza una sonda a contatto meccanico, ha il vantaggio di una elevata velocità di acquisizione, un'accuratezza che può raggiungere dei livelli discreti anche se molto inferiori rispetto al rilevamento meccanico, un'assoluta ininfluenza delle condizioni d'illuminazione, l'uniformità del dato acquisito, la necessità di un singolo operatore con un notevole vantaggio economico e di risorse, ma soprattutto il fatto che il sistema non viene a contatto con l'oggetto.

Per contro la mole di dati da gestire è notevole e necessita di un processing abbastanza impegnativo anche se le possibilità offerte dall'hardware e dal software odierno permettono un'elaborazione veloce; inoltre se la campagna di rilievo non è stata adeguatamente pianificata ci si può trovare con una mole di dati notevole e per certi versi inutile.

La norma che tratta la verifica delle prestazioni dei sistemi di misura non a contatto è la guida tedesca VDI/VDE 2634 Part 2.

Nella norma tedesca è espressamente affermato che la medesima norma non riguarda quei sistemi di visione stereo che uniscono più viste singole di un particolare, cioè più acquisizioni dello stesso, per formare un'immagine unica del medesimo. Quindi, tale direttiva non si può considerare valida per definire la procedura di validazione di un sistema stereo, quando questo è impiegato nella ricostruzione tridimensionale di un particolare mediante molteplici acquisizioni dello stesso, bensì, solo per definire la procedura di validazione di un sistema stereo relativamente ad una singola acquisizione.

Ciò vuol dire che, in pratica, la norma tedesca definisce una procedura di validazione atta a rilevare la precisione di un digitalizzatore nel ricostruire la scena ripresa mediante una singola acquisizione; invece, la trattazione inerente alla precisione di un digitalizzatore nel ricostruire un oggetto tridimensionale allineando molteplici acquisizioni, è un problema a parte. Infatti si nota come la procedura di allineamento di più acquisizioni (o meglio delle relative nuvole di punti che rappresentano ognuna di esse) sia un'ulteriore fonte di errori di ricostruzione, i quali, a loro volta, rendono il raggiungimento di una buona precisione nella digitalizzazione tridimensionale di un oggetto, ancora più difficile da ottenere, rispetto ad una buona precisione nella digitalizzazione di una scena ripresa con una singola acquisizione. Nel primo tipo di digitalizzazione vanno a sommarsi gli errori di ogni singola acquisizione a quelli dovuti all'allineamento di tutte le acquisizioni, mentre, nel secondo tipo di digitalizzazione sono presenti solo gli errori relativi alla singola acquisizione. Quindi è palese come sia più difficile ottenere una buona precisione di ricostruzione nelle digitalizzazioni del primo tipo, affette da una fonte di errori maggiore, rispetto a quelle del secondo tipo.

Pertanto la norma VDI/VDE 2634 Part 2 non è interamente applicabile allo strumento in esame, poiché non è possibile ottenere una singola acquisizione senza spostare il laser.

Si deve però sottolineare che bisognerebbe sempre svolgere la prova di accettazione nelle stesse condizioni operative in cui opera generalmente il sistema.

Pertanto nel caso dello strumento laser in esame, per digitalizzare un oggetto tridimensionale è sufficiente una sola acquisizione dello stesso, perché pur variando la posizione relativa digitalizzatore-oggetto non è necessario allineare tra loro le nuvole di punti ottenute in quanto il sistema utilizza un sistema di riferimento comune.

Si partirà quindi da questa norma per valutare le prestazioni del laser.

3 Capitolo 3 - Progetto campagna sperimentale

3.1 Introduzione

Nel capitoli precedenti si sono trattati i bracci articolati di misura e i sistemi ottici, descrivendone le caratteristiche peculiari, i principi di funzionamento e la normativa vigente di riferimento.

Con riferimento alla normativa riportata, si procede ora ad un'ipotesi di procedura di taratura o, più generalmente, a individuare una metodologia di validazione di un sistema braccio articolato che integra un sistema di scansione non a contatto, analizzando tutti i possibili parametri di taratura, poiché l'obiettivo è quello di accertare la precisione con la quale il sistema rileva i componenti tridimensionali.

Ogni produttore definisce le prestazioni metrologiche, indispensabili per il controllo dello strumento in fase di utilizzo, nel certificato di calibrazione che normalmente accompagna ogni strumento di misura.

Nel caso di sistemi per acquisizioni tridimensionali con o senza contatto è indispensabile conoscere a priori non solo il campo di presa in funzione della distanza dall'oggetto, ma anche altre caratteristiche metrologiche senza le quali non si possiede il controllo dello strumento e difficilmente si può valutare la qualità del rilievo.

Purtroppo la mancanza di standard di riferimento implica spesso che ogni produttore fornisca dati disomogenei, diversi e incompleti, senza spiegarne l'origine e la modalità di valutazione.

D'altra parte il processo di calibrazione o di taratura di uno strumento richiede l'attuazione di procedure complesse tramite l'ausilio di strumenti sofisticati ed artefatti elaborati.

Negli ultimi anni si è cercato di affermare da un lato l'importanza della tracciabilità metrologica di un processo di acquisizione ed elaborazione di dati, dall'altro la definizione di metodologie a basso costo che permettono di ottenere una caratterizzazione dei sistemi di acquisizione con un buon livello di affidabilità.

La qualità del livello di caratterizzazione dipende soprattutto dalla procedura metodologica che tiene conto dell'ambiente nel quale avviene il rilievo e della qualità metrologica degli artefatti utilizzati, che generalmente sono certificati.

Mediante l'utilizzo di questi oggetti si possono valutare oggettivamente l'accuratezza, la precisione e la risoluzione di un braccio articolato di misura o di uno scanner 3D, a prescindere dal loro principio di funzionamento.

Dopo aver analizzato le norme di riferimento e gli ambiti che regolamentano, si è concentrata l'attenzione sull'analisi comparativa delle norme relative al singolo strumento di misura.

Pertanto la procedura di taratura di un sistema prevederà tre fasi distinte, volte a definire le caratteristiche per il singolo sistema di misura: la taratura del braccio con sistema tastatore a

contatto, la taratura del sistema laser rendendo minima l'influenza del braccio articolato e infine la taratura del sistema integrato.

Queste fasi di verifica si sono concretizzate in una serie rilevazioni sperimentali che ha coinvolto entrambi i sistemi di misura e che verranno riportate nel capitolo successivo.

3.2 Braccio integrato con laser

Generalmente si cerca di legare le potenzialità degli strumenti al concetto di complessità del modello fisico.

Nell'ottica strumentale una forma può essere definita semplice se è caratterizzata da geometrie riconducibili a piani, cubi, parallelepipedi, cilindri, sfere o comunque forme esprimibili matematicamente. Per queste è sufficiente rilevare le forme attraverso le informazioni geometriche di base.

In questo caso l'uso di CMM ne permette l'acquisizione tridimensionale.

Se le geometrie sono complesse, la descrizione spaziale non può avvenire attraverso il rilievo di pochi punti, ma è necessario ricorrere a strumenti che permettano di campionare l'andamento spaziale attraverso una matrice di punti ad alta densità, come ad esempio uno strumento ottico a scansione.

Pertanto la compresenza di superfici free-form e primitive geometriche ben definite, suggeriscono l'opportunità di ricorrere a forme di rilievo basate sull'integrazione di tecniche diverse.

Un esempio è il *braccio articolato di misura con integrato un laser a scansione.*

L'uso del laser scanner presenta notevoli vantaggi legati alla velocità e agli automatismi in fase di acquisizione, alla possibilità di variare la risoluzione di acquisizione in funzione della geometria e alla capacità di rilevare forme di qualsiasi livello di complessità e all'indipendenza della luce ambientale.

Il braccio articolato di misura essendo un dispositivo di misura portatile può essere trasportato rapidamente e facilmente in diversi luoghi di lavoro e permette facilmente di raggiungere il componente da misurare, senza dover, nella maggior parte delle misurazioni, riposizionare il componente

L'unione dei suddetti vantaggi rende questi strumenti molto versatili e tali da giustificare il loro elevato impiego.

3.3 Pianificazione della verifica sperimentale

Il piano di verifica sperimentale delle prestazioni del braccio e del laser è stato definito con l'obiettivo di determinare le prestazioni di ciascun sistema con riferimento alla normativa vigente e individuare quali caratteristiche influenzano maggiormente le misurazioni, per ottimizzare le prestazioni.

Le suddette rilevazioni sono state pianificate seguendo i dettami di una metodica sperimentale già collaudata: il DOE. Questo termine è l'acronimo delle parole inglesi *Design Of Experiments*, ed è comunemente impiegato per indicare la metodica sperimentale in questione.

Il DOE si articola in varie fasi, che vengono illustrate di seguito.

La prima fase consiste nella definizione del problema, perché prevede sia la definizione degli obiettivi delle prove sperimentali condotte sul sistema in esame, che la definizione delle modalità di verifica dei medesimi obiettivi; inoltre, si fa notare che l'insieme delle prove sperimentali condotte secondo la metodica DOE, è indicato col termine "campagna di prove".

In questa fase vengono quindi definiti sia i parametri da rilevare, che i cosiddetti "fattori d'influenza": i primi sono le grandezze caratteristiche del sistema in esame e sono misurate durante la campagna di prove; i secondi, invece, sono quei fattori che producendo la variazione di tali grandezze e possono essere impiegati nell'ottimizzazione delle prestazioni del sistema stesso. Tuttavia vi è pure la necessità d'identificare l'ampiezza degli intervalli in cui, durante le prove, possono variare i fattori d'influenza, perciò anche tali intervalli vengono definiti in questa prima fase.

La seconda fase del DOE, invece, consiste nella progettazione degli esperimenti e prevede che si effettui la scelta di alcuni tra i fattori d'influenza precedentemente individuati, sui quali si concentrerà l'attenzione durante le prove. In questa fase si devono quindi definire delle procedure di prova che evidenzino l'effetto dei fattori d'influenza in esame, sui parametri rilevati. Per contro tali procedure devono anche consentire di eliminare, o quanto meno di ridurre, l'effetto che hanno sugli stessi parametri, i fattori d'influenza non in esame. A tal proposito si sottolinea che ogni fattore d'influenza considerato non può variare in maniera continua, all'interno del proprio intervallo di variabilità, ma può solo assumere dei valori discreti, denominati "livelli", all'interno dell'intervallo stesso.

La terza fase del DOE consiste nella definizione del numero delle prove che compongono la campagna di prove da mettere in atto, esso deve quindi essere tale da consentire il raggiungimento degli obiettivi definiti in precedenza; si noti però, che la quantità di prove da realizzare dipende direttamente sia dal numero dei fattori d'influenza considerati, che dal numero di livelli da valutare per ciascun fattore. Questa fase si conclude poi con l'esecuzione delle prove di cui si fornisce una descrizione del loro svolgimento e che verranno effettuate nel capitolo successivo di seguito.

Per effettuare un'ipotesi di proposta di integrazione della normativa esistente è necessario definire e validare una procedura di taratura per tali tipologie di strumenti.

Inizialmente si analizza la normativa vigente per gli strumenti braccio di misura e sistema ottico separatamente, proponendo una serie di prove per il singolo strumento e indagando per ciascuno i vari tipi di errori relativi a misure dimensionali, di forma e di posizione. Solo successivamente si valuta una modalità di verifica delle prestazioni del sistema braccio articolato di misura che integra un sistema ottico a scansione.

Per cui le operazioni descritte in seguito possono essere suddivise in base a due finalità: ricavare l'errore di indicazione per misure di dimensioni (E) e gli errori relativi a misure di forma, cioè tastatura (P), ripetibilità (ΔX e ΔY) e tastatura in scansione (T). A seconda dell'obiettivo sono richiesti campioni e modalità di misura diverse, ipotizzati di volta in volta, e anche le norme di riferimento cambiano.

Le norme di riferimento per tali tipologie di strumenti sono già state ampiamente discusse ed interpretate nei capitoli precedenti. Si cercherà ora di applicarle per la valutazione delle prestazioni del sistema, valutando e stilando un programma di lavoro, con l'obiettivo di realizzare una procedura di taratura di tali strumenti.

3.3.1 Valutazioni prestazioni del braccio con la sonda a contatto

Per quanto concerne le misure di dimensione effettuate con il braccio, lo studio si propone di:

- caratterizzare la ripetibilità della sonda a contatto valutando la qualifica del tastatore
- valutare la qualità delle misure eseguite secondo la norma ISO 10360-2 per il calcolo dell'errore di indicazione E per misure dimensionali, da confrontare con MPE_E .
È lo stesso metodo su cui si basa la VDI/VDE 2617-9, poiché tale norma trae ispirazione proprio dalla ISO 10360-2.

- valutare la qualità delle misure eseguite secondo la norma ASME B89.4.22.
Tale norma prevede l'utilizzo di ball bar di default

Per valutare quale dei due approcci è il più adatto per verificare le prestazioni del braccio vanno definiti i seguenti punti:

- ✓ Campioni da utilizzare (blocchetti piano paralleli o ball-bar)
 - ✓ Dimensioni preliminari dei campioni
 - ✓ Fissaggio dei campioni su attrezzature e scelta del piano di lavoro.
 - ✓ Strategia di misura
 - ✓ Allineamento del campione
 - ✓ Metodo di misura
 - Definire il numero di punti
 - Definire quali elementi geometrici ricavare e stabilire il metodo di elaborazione degli elementi
 - Convalidare un metodo di misura che preveda il calcolo della distanza fra elementi geometrici costruiti invece che fra singoli punti.
Infatti, essendo uno strumento manuale, non è nota la direzione di tastatura e nella tastatura di punti singoli la compensazione del raggio del tastatore non sarebbe corretta.
 - Valutare la possibilità di orientazione del tastatore nelle prese punto.
 - BPP: tastatore ortogonale, tangenziale (di taglio) o inclinato rispetto alla faccia di misura
 - Ball-bar: tastatore ortogonale al punto o in un'unica inclinazione per ciascun punto della sfera.
 - Definire la modalità di contatto tra tastatore e campione
 - Definire la posizione che deve assumere il braccio durante la misura.
 - ✓ Valutare la qualità delle misure in tutte le posizioni possibili all'interno del volume di lavoro del braccio di misura e individuare le più critiche. (considerazioni)
 - ✓ Valutare l'influenza della temperatura e introdurre la compensazione termica.
 - ✓ Effettuare la simulazione di una taratura, con lo scopo di risolvere i problemi e rendere chiari e leggibili i risultati
-
- Stimare l'incertezza di misura secondo la ISO/DTS 23165 "Guide to the evaluation of CMM test uncertainty"

- Valutare quale approccio normativo è più significativo per determinare le prestazioni del braccio di misura riguardo alle misure di forma mediante il calcolo degli errori di tastatura P, di ripetibilità ΔX e ΔY e di tastatura in scansione T
 - ✓ Effettuare la scelta dei campioni (sfera od anello)
 - ✓ Valutare l'applicazione della ISO 10360-2 (sfera con 25 punti)
 - ✓ Valutare l'applicazione della VDI/VDE 2617-9 (sfera con 5 punti con 5 orientamenti)
 - ✓ Verificare l'applicabilità della ISO 10360-2 alla VDI/VDE 2617-3 (anello)
 - ✓ Sfera:
 - Definire l'influenza della numerosità di punti tastati per il rilevamento
 - Valutare l'orientazione più adatta del tastatore rispetto alla superficie da tastare
 - ✓ Anello
 - Verificare il metodo di allineamento
 - Verificare la strategia di misura, con riguardo alla numerosità dei punti
 - Definire le posizioni di misura nel volume di lavoro
 - ✓ Valutare la possibilità di tastare consecutivamente punti adiacenti o diametralmente opposti sui campioni
 - ✓ Studiare le modalità di approccio e l'inclinazione preferibile dal tastatore rispetto alla superficie dei campioni
 - ✓ Analizzare il tipo di contatto da mantenere tra tastatore e superficie approssiata
 - ✓ Individuare le posizioni dei campioni più critiche per il braccio
 - ✓ Costatare l'applicabilità della ISO 10360-4 per il calcolo dell'errore di tastatura in scansione, su sfere ed anello
 - ✓ Studiare gli effetti dovuti alla velocità di scansione
 - ✓ Verificare la qualità e la ripetibilità delle misure in posizioni differenti, anche al limite del raggio d'azione del braccio articolato.

- Valutare quale approccio normativo è più significativo per determinare le prestazioni del braccio di misura riguardo alle misure di posizione
Tale considerazione discende dalle scelte proposte elencate nel paragrafo precedente.
 - ✓ La norma B89.4.22 utilizza per tale verifica, detta anche SPAT, una sede conica o con tre sfere. L'uso di una sede conica, oltre ad essere un modo utilizzato dal costruttore per verificare le specifiche del braccio in sede di taratura, è anche utilizzato dall'utilizzatore per la qualifica del tastatore.
 - ✓ La norma VDI/VDE 2617-9 utilizza una sfera, in particolare gli stessi dati utilizzati per le misure di forma.
 - ✓ Verificare l'applicazione della norma all'anello (coordinate del centro) sia in tastatura che in scansione.

3.3.1.1 Qualifica del tastatore

Il primo parametro da valutare e da tenere in considerazione è la qualifica del tastatore, sia della sonda a contatto che della sonda laser.

La calibrazione della sonda è un processo localizzato con il quale si ottimizza un dispositivo di misurazione per eseguire con accuratezza le misure.

I metodi disponibili per la qualifica del tastatore a contatto sono due: la calibrazione con quindici punti rilevati su una sfera con basso errore di forma, o con 600 punti ottenuti posizionando il tastatore su un foro conico e muovendolo lungo tre direzioni ruotate di 120° l'una dall'altra.

Entrambi i metodi sono allineati con la norma B89.4.22.

La qualifica tramite sfera è allineata al test su sfera a singolo punto, mentre quella su foro conico è allineata al test S.P.A.T., con i quali il costruttore verifica il braccio di misura.

La qualifica del tastatore prescelta è stata quella su foro conico, per i seguenti motivi:

- ✓ coerenza con il metodo di taratura scelto tra quelli proposti dal costruttore;
- ✓ maggiore quantità di punti rilevati;
- ✓ minore influenza della manualità dell'operatore.

3.3.1.2 Errore di dimensione

I campioni da utilizzare per la valutazione dell'errore di indicazione possono essere scelti tra un set di blocchetti piano paralleli e una serie di ball bar, a seconda della norma che si vuole utilizzare come riferimento.

La norma ISO 10360-2 e la VDI/VDE 2617-9 prevedono l'impiego di 5 campioni e che la dimensione massima di uno di questi sia almeno il 66% della dimensione della massima diagonale 3D del volume di misura della macchina di misura. È chiaro che un braccio di misura ha un volume di lavoro sferico, per cui la dimensione massima dovrebbe essere almeno il 66% della lunghezza del diametro del volume di lavoro.

Il set di blocchetti piano paralleli è costituito dai seguenti nominali: 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm e 500 mm.

La B89 prevede l'impiego di due ball bar di lunghezze diverse. Le ball bar, che sono in acciaio, non possono assumere dimensioni troppo elevate, poiché avrebbero un peso non gestibile. A disposizione per tali prove si hanno le ball bar in Figura 3-1, i cui valori nominali sono riportati in

Tabella 3-1.

Codice Ball Bar	Diametro sfere [mm]	Distanza centri sfere [mm]
BB/15-32	15	32
BB/30-55	30	55
BB/55-82	55	82
BB/55-123	55	123
BB/85-246	85	246

Tabella 3-1- Valori nominali delle ball bar

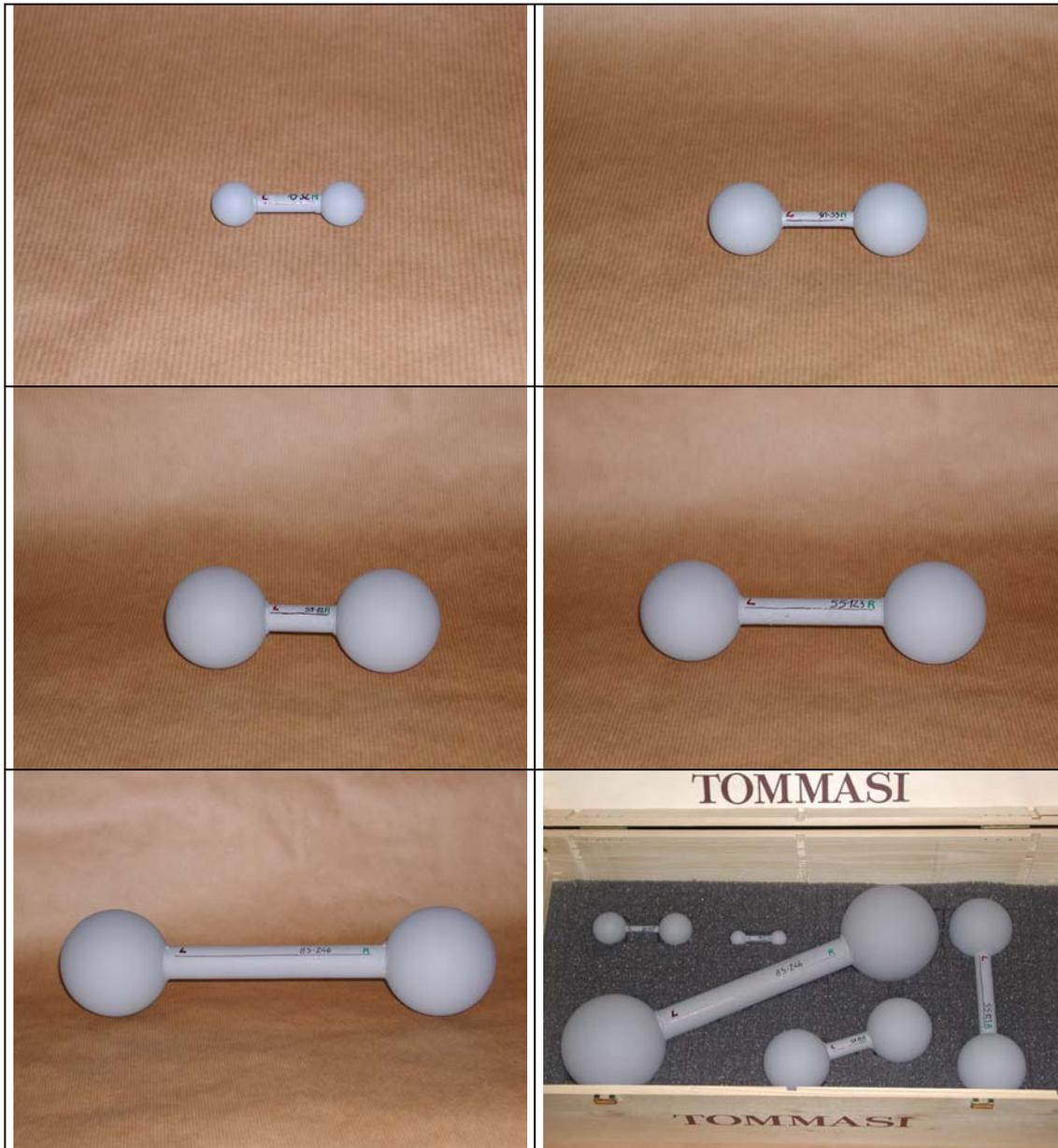


Figura 3-1 - Ball bar

Secondo la ISO 10360-2 i campioni vengono posizionati nel volume di lavoro in 7 posizioni e misurato ciascuno 3 volte, per un totale di 105 valori. LE orientazioni dei campioni devono rispettare le tre direzioni coordinate del sistema di riferimento della macchina.

La B89, invece, prevede di misurare le due lunghezze in 20 posizioni del volume di lavoro, secondo uno schema di orientazioni stabilito.

Come ipotesi di misura le posizioni vengono stabilite seguendo i criteri espressi dalla norma ISO 10360-2 e rispettano le tre direzioni coordinate del sistema di riferimento della macchina (coordinate sferiche con origine nella base d'appoggio del braccio): radiale (indicata con Rad), tangenziale (Tang), diagonale (Diag), ossia inclinata rispetto a tutti e tre gli assi e verticale (Vert).

Alcune orientazioni del campione verranno ripetute in posizione vicina (Vic) o lontana (Lont) rispetto alla base del braccio, mentre le due diagonali sono ruotate di 90° l'una rispetto all'altra, sia lungo il piano verticale che lungo quello orizzontale.

L'obiettivo ora è definire la strategia di misura (numero di punti di misura, distribuzione dei punti di misura, algoritmo di fitting) per il controllo dei campioni attraverso macchine di misura articolate.

Ci si propone di studiare la relazione tra il numero di punti di misura e la stima prodotta dagli algoritmi di fitting esistenti in letteratura e in normativa, valutando se con strategie di misura diverse si possono ottenere risultati caratterizzati da una accuratezza migliore. Alla luce di ciò si ipotizza quindi una strategia di misura per i blocchetti piano paralleli.

Si propongono innanzitutto tre metodi di allineamento dei blocchetti piano paralleli che sono di seguito descritti.

Il metodo di allineamento e misura denominato **6P** consiste nel rilevare con almeno cinque punti tutte le sei facce del blocchetto, trovare tutti gli spigoli per intersezione, tracciare le diagonali passanti per essi su ogni faccia e individuare per mezzo di queste ultime i punti centrali di ogni lato del blocchetto.

L'asse primario di allineamento è definito come la retta passante per i punti centrali delle facce di misura, il secondario come la retta passante per i punti centrali delle facce più ampie; l'origine è collocata in uno dei due punti centrali delle facce di misura.

La misurazione per ottenere la dimensione del blocchetto di riferimento prevede di tastare alternativamente una volta le due facce di misura, 3 volte ciascuna, e calcolare la distanza fra ogni coppia di punti, lungo la direzione dell'asse primario, come previsto dalla ISO 10360-2.

Il metodo chiamato **3P-2p** è allineato con la norma UNI EN ISO 10360-2. L'allineamento prevede la rilevazione di tre facce del blocchetto: l'asse primario è la direzione normale alla faccia maggiore, il secondario corrisponde alla direzione della normale della faccia di dimensioni intermedie, e l'origine è collocata nello spigolo intersezione delle tre facce, o può indifferentemente essere traslata al centro di una faccia di misura.

La misurazione avviene anche in questo caso tastando alternativamente le due facce di misura.

Il metodo **3P-1p** è il più rapido. L'allineamento è eseguito allo stesso modo del metodo 3P-2p, ma la misura di lunghezza viene calcolata come distanza tra un unico punto tastato sulla faccia di misura opposta all'origine e il corrispondente piano parallelo opposto.

L'individuazione di un sistema di allineamento delle sfere non è strettamente necessario, poiché il parametro per valutare l'errore di dimensione è calcolato come distanza spaziale tra due punti, che sono i centri delle due sfere.

Per valutare la distanza tra le due facce del blocchetto piano parallelo si può operare in due modi:

- distanza punto-punto, ossia tastando un punto su ciascuna faccia e calcolare la distanza;
- distanza tra superfici, ossia tastando un piano su ciascuna faccia e valutare la distanza tra esse.

A priori non è possibile effettuare una scelta, poiché solo la tastatura vera e propria permette di stabilire il metodo che introduce una minor incertezza. Si osserva fin da subito, però, che il metodo punto-punto potrebbe avere delle problematiche relative alla compensazione del raggio del tastatore.

Infine si deve porre attenzione sull'orientazione del tastatore rispetto alla superficie misura in fase di acquisizione del punto.

Infatti il tastatore può rilevare il punto in maniera tangenziale, ortogonale o inclinata rispetto alla superficie del blocchetto, come indicato in Figura 3-2.

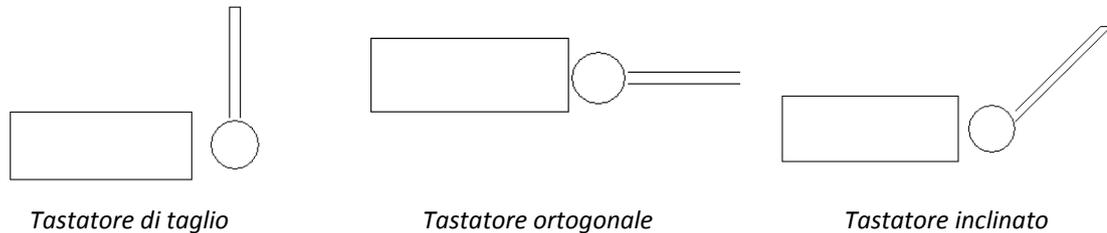


Figura 3-2 - Possibili orientazioni del tastatore

Per quanto riguarda le sfere, invece, le norme prevedono un numero diverso di punti per la rilevazione dell'elemento.

La B89.4.19, per le macchine di misura a coordinate, prevede un numero di punti di tastatura pari a 4. Questo è giustificato dal fatto che l'errore dovuto alla tastatura non è elevato, trattandosi di una macchina non manuale, quindi non dipende dall'operatore e si può controllare la direzione di tastatura.

La B89.4.22, espressamente riferita ai bracci di misura, consiglia un numero di 9 punti per la rilevazione della sfera.

La VDI/VDE 2617-9 tiene conto anche dell'orientazione del tastatore e prevede la misura di 5 sfere con cinque orientazioni del tastatore diverse, per un totale di 25 punti, che sono lo stesso numero di punti proposti dalla ISO 10360-2.

L'utilizzo di un basso numero di punti di tastatura porta ad un errore di forma dell'elemento molto basso, ma allo stesso tempo può portare ad un errore significativo del calcolo del diametro, poiché basta un punto tastato non correttamente perché la sfera abbia un elevato errore di posizionamento.

Infatti per quattro punti passa una sola sfera.

Per la taratura delle sfere si propongono due orientazioni del tastatore. La prima utilizza un'unica orientazione per la tastatura della superficie, mentre la seconda mantiene il tastatore sempre ortogonale alla superficie e pertanto sfrutta più configurazioni del polso del braccio, come richiesto dalla VDI/VDE 2617 Part 9.

Infine si valuta l'errore e si confronta con l' MPE_E dichiarato dal costruttore.

L'errore di dimensione nel caso dei blocchetti piano paralleli sarà la differenza tra la distanza rilevata tra le due facce del blocchetto e il valore presente nel certificato di taratura.

Nel caso delle ball bar, invece, viene confrontata la distanza tra i centri delle sfere tastate e la distanza nominale.

$$E = l_m - l_k$$

Questo errore viene rappresentato in un grafico per confrontarlo con il massimo errore permesso dimensionale MPE_E .

3.3.1.3 Errore di forma

Per quanto riguarda le misure per valutare l'errore di forma le norme prevedono l'utilizzo di 2 campioni differenti: la sfera o l'anello.

La possibile strategia di misura e le modalità di tastatura della sfera sono già state discusse nella valutazione dell'errore di dimensione utilizzando le ball bar.

L'utilizzo di un anello come campione per la verifica dell'errore di dimensione e di ripetibilità ha il vantaggio di valutare sparando il contributo di errore dei singoli giunti, infatti in posizioni particolari alcuni giunti non lavorano, mentre altri sono

Questo non è possibile utilizzando una sfera, poiché l'elemento geometrico sfera non ha un asse principale di riferimento.

Infine si valuterà l'errore di tastatura in scansione, adattando la ISO 10360-4 al campione scelto per la procedura di verifica delle prestazioni.

3.3.1.4 Influenza della temperatura

Le temperature registrate sono confrontate con quella di riferimento, che è pari a 20°C. La differenza tra la temperatura registrata e quella di riferimento è il valore ΔT , che è responsabile della variazione di lunghezza del campione.

Il braccio possiede al suo interno dei sensori che correggono automaticamente le misure, perciò la compensazione riguarda solamente le lunghezze nominali dei blocchetti.

Infatti i campioni presentano coefficienti di dilatazione termica che, qualora la temperatura differisca da 20 °C, ne fanno variare la lunghezza, allungando o accorciando il campione a seconda che la temperatura alla quale si trovano sia superiore (ΔT positivo) o inferiore (ΔT negativo) alla temperatura di riferimento.

Posto come coefficiente di dilatazione termica dei blocchetti $\alpha = 1,15 \times 10^{-5} \text{ mm/}^\circ\text{C}$, è possibile individuare la variazione di lunghezza subita dal campione a causa della temperatura:

$$\Delta L_{temp} = L_{tar} \cdot \alpha_r \cdot \Delta T$$

dove :

L_{tar} = lunghezza nominale del campione

α = coefficiente di dilatazione termica = $1,15 \times 10^{-5} \frac{mm}{K}$

ΔT = differenza di temperatura = $(20 - T_{misurata}) \text{ } ^\circ\text{C}$

Togliendo ad ognuno dei dieci errori precedentemente calcolati il contributo della temperatura rappresentato dal ΔL_{temp} si ottengono i dieci errori E compensati.

3.3.2 Valutazioni prestazioni della sonda laser

L'ipotesi di valutare le prestazioni della sonda laser prevede di valutare tali prestazioni indipendentemente dall'articolazione del braccio. Questo nell'ottica di applicare, o almeno adattare, la VDI/VDE 2634-2 a questa tipologia di strumenti.

Come già enunciato è chiaro che per questi strumenti non è presente alcuna norma per valutare le prestazioni, e la VDI/VDE 2634-2 ha dei punti da chiarire.

Innanzitutto circa le dimensioni dei provini. Il volume di lavoro che si considera in questa fase non è quello del braccio, che richiederebbe dei provini estremamente lunghi, ma si considera sono il range di lavoro dello strumento ottico.

Con questa assunzione i campioni che dovranno essere impiegati avranno dimensioni ridotte in quanto il fascio laser ha una risoluzione in z e un campo di misura dell'ordine di qualche decina di millimetro. Per la scheda tecnica dello strumento utilizzato per la campagna di misurazione si veda l'Appendice 3.

Per quanto riguarda l'applicabilità della norma a strumenti che utilizzano un'unica vista di acquisizione, si può fare una precisazione: il laser di cui si vuole valutare le prestazioni è integrato in un braccio di misura e non avrebbe alcun senso bloccare il braccio e la sonda per applicare alla lettera la norma. Questo perché in condizioni operative non si avrà mai un tale utilizzo. Infatti utilizzando strumenti di questo tipo le coordinate dei punti si ottengono come combinazione delle posizioni dei giunti del braccio, per cui non è necessario ricombinare le eventuali viste se l'oggetto viene mantenuto nella stessa posizione, anche se la sonda laser si sposta attorno all'oggetto, riposizionandosi continuamente rispetto al campione da misurare.

Piuttosto si cercherà di verificare le prestazioni del sistema ottico limitando al massimo l'articolazione del braccio.

Sarebbe pertanto innaturale verificare le prestazioni di una sonda laser integrata in un braccio di misura cercando di mantenere fisso lo strumento. Questo per due ragioni:

- ✓ la prima è che se tutta la strumentazione viene mantenuta immobile il solo rilevamento che si ottiene in un'unica acquisizione è una strip di punti, in quanto si ha una lama di laser, come mostrato in Figura 3-3 - Scansione 3-D tramite strisce laser: Digitalizzatore ottico.
- ✓ La seconda motivazione è legata alle condizioni di normale utilizzo: tali strumenti sono nati e si sono ampiamente sviluppati nel mercato odierno proprio per la possibilità di muoversi attorno all'oggetto. Sarebbe pertanto innaturale bloccare i movimenti, in quanto non sono le condizioni di misura reali.

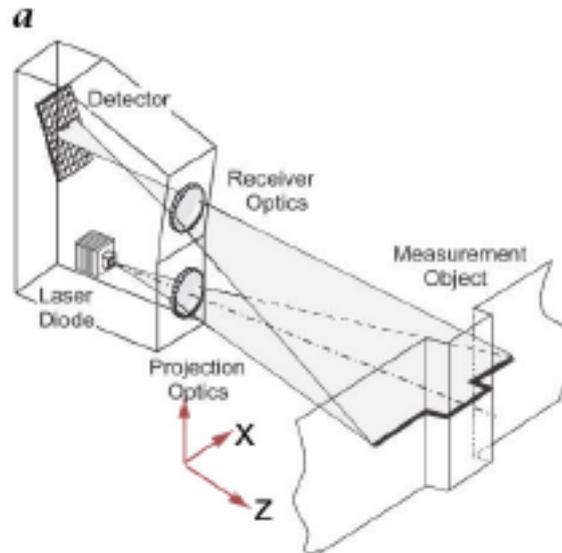


Figura 3-3 - Scansione 3-D tramite strisce laser: Digitalizzatore ottico

Si cercherà, però, in questa fase di valutazione delle prestazioni della sonda laser, di rendere minimo il numero tali movimenti.

Le fasi di lavoro possono essere pianificate come segue:

- Inizialmente viene valutata la fase di calibrazione della sonda laser. Essa avviene a seguito della calibrazione della sonda a contatto mediante un piano di riferimento bianco. Si vuole valutare, in fase di calibrazione, sia l'influenza della zona di lavoro sia l'influenza della calibrazione della sonda a contatto, mantenendo invariata la zona di lavoro.
- Per questa tipologia di strumentazione non è vigente una normativa specifica, per cui si valuta l'adattabilità della VDI/VDE 2634-2. La norma VDI/VDE 2634-2 prevede l'applicabilità a strumenti che operano con un'unica acquisizione.

Tale norma, come già visto nel Capitolo 2, prevede la valutazione di tre parametri:

- ✓ Errore di dimensione SD mediante 7 acquisizioni di un manubrio posizionato in 7 zone del volume di lavoro
Questo porta a:
 - scegliere i campioni
 - definire la modalità di acquisizione della sfera
 - definire le posizioni del campione nel volume di lavoro (considerazioni)
- ✓ Errore di forma o di tastatura R mediante l'utilizzo di una sfera in 10 posizioni differenti.
Nota: il costruttore utilizza un cilindro.
- ✓ Errore di planarità R_E mediante 6 acquisizioni di un piano.
Osservazioni: la norma prevede che le dimensioni di tale campione siano.....

In questo caso non viene utilizzato un campione in funzione delle dimensioni del volume di lavoro del braccio ma del range del laser.

3.3.2.1 Qualifica della sonda

La sonda non a contatto viene calibrata utilizzando la piastra di calibrazione fornita dal costruttore che è costituita da un piano bianco, essendo una superficie otticamente cooperante.

Tale superficie viene misurata una volta con la sonda a sfera tastando otto punti sul piano e tre volte con la sonda laser.

La calibrazione consiste in una procedura guidata e definita dal costruttore, che dà esito positivo o negativo a seconda dell'errore massimo che rileva. Se quest'errore è superiore alla specifica di precisione di un punto singolo la calibrazione non è andata a buon fine.

Quello che non è noto è un'eventuale influenza della sonda a contatto (sfera) sui parametri di calibrazione della sonda laser.

Si vuole valutare con una campagna di misure adeguata i parametri di ripetibilità e riproducibilità della sonda laser e verificare quali campioni sono i più adatti nell'evidenziare le caratteristiche del sensore.

In questa fase di progettazione non si terrà conto della possibilità di adattare le linee guida presenti nella VDI/VDE 2617 Part 6.2 o nella ISO 10360-7, poiché tali norme sono riferite a macchine di misura a coordinate con integrato un sensore ottico. Esse hanno un principio di funzionamento troppo differente dallo strumento oggetto di studio.

3.4 Parametri di taratura del costruttore dello strumento

Il braccio è stato tarato dal costruttore e in quest'operazione sono stati valutati i seguenti parametri per la sonda a contatto:

- Ripetibilità: il test della ripetibilità a singolo punto consente di verificare la sonda e la ripetibilità per mezzo di un foro singolo o di un cono o di una sfera di riferimento. I valori misurati e riportati nel certificato di calibrazione dello strumento comprendono tutti i valori rilevati e il risultato si ottiene dividendo per due e sottraendo il valore minimo di ciascuna coordinata spaziale da quello massimo, ossia $(Max-Min)/2$.

La normativa per il test della precisione è ASME per il Nord America ed ISO per l'Europa. Lo standard ANSI B89 descrive la precisione come errore massimo.

- Precisione volumetrica: la precisione volumetrica invece viene misurata utilizzando un artefatto di lunghezza documentabile, che può essere una barra a sfere o un calibratore a gradini. Le misurazioni vengono distribuite in modo uniforme in tutte le regioni del volume di lavoro.

Per la sonda laser è stato utilizzato un cilindro in diverse posizioni del volume di lavoro.

Le considerazioni e le ipotesi fino qui effettuate si possono riassumere nella Tabella 3-3. Sarà la campagna sperimentale descritta nel capitolo successivo a stabilire se l'ipotesi di procedura proposta possa essere accettata.

Errore valutato	Parametro	Riferimento normativo (se contemplato)	Hp Scelte
Errore di indicazione E	Errore	ISO 10360-2	$E = L_{\text{misurata}} - L_{\text{nominale}}$
		ASME B89.4.22	$E = L_{\text{misurata}} - L_{\text{nominale}}$
		VDI/VDE 2617-9	$E = L_{\text{misurata}} - L_{\text{nominale}}$
	Campione	ISO 10360-2	Blocchetti piano paralleli
		ASME B89.4.22	Ball bar
		VDI/VDE 2617-9	Blocchetti piano paralleli
	Numerosità e dimensioni dei campioni	ISO 10360-2	5 lunghezze, di cui la maggiore almeno il 66% della dimensione massima del volume di lavoro
		ASME B89.4.22	2 lunghezze
		VDI/VDE 2617-9	5 lunghezze, di cui la maggiore almeno il 66% della dimensione massima del volume di lavoro
	Posizione dei campioni	ISO 10360-2	7 posizioni che coprono il volume di lavoro
		ASME B89.4.22	20 posizioni
		VDI/VDE 2617-9	7 posizioni
	Orientazione dei campioni	ISO 10360-2 VDI/VDE 2617-9	Devono rispettare le tre direzioni coordinate del sistema di riferimento della macchina
		ASME B89.4.22	Come da Figura 1-15 - Schema delle posizioni di "default" del campione per la verifica di dimensione Figura 1-15

Errore valutato	Parametro	Riferimento normativo (se contemplato)	Hp Scelte	
	Misure	ISO 10360-2	3 misure di ogni lunghezza per ogni posizione	
		ASME B89.4.22	1 misura di ogni lunghezza per posizione	
		VDI/VDE 2617-9	3 misure di ogni lunghezza per ogni posizione	
	Fissaggio dei campioni			Piastra
				Supporto dedicato
	Piano di lavoro			Piano di ghisa
				Piano di granito
	Allineamento del campione			6P
			ISO 10360-2	3P-2p
				3P-1p
	Numeri di punti di tastatura	B89.4.22	9 punti per sfera	
	Orientazione del tastatore rispetto alla superficie di misura nella presa punto			Ortagonale
				Tangenziale o di taglio (nel caso del piano)
				Inclinato di 30° (nel caso del piano)
				Unica orientazione per tutti i punti (nel caso della sfera)
	Elementi geometrici da ricavare		Punto, Linea, Piano, Sfera,	
	Calcolo distanza			Tra elementi geometrici
			Tra singoli punti	
Modalità contatto tra tastatore e campione			Staccarsi ad ogni singolo punto	
			Rimanere in contatto durante l'acquisizione	
Stima incertezza	ISO/DTS 23165	Tabella PUMA		
Errore di forma PF	Errore	ISO 10360-2	P, di tastatura	
		VDI/VDE 2617-9	PF (rotondità)	
			Ripetibilità	
	Campione	ISO 10360-2	Sfera	

Errore valutato	Parametro	Riferimento normativo (se contemplato)	Hp Scelte
		VDI/VDE 2617-3	3D-Sfera
			2D-Anello
			1D-Piano
	Numeri di punti di tastatura per sfera	VDI/VDE 2617-9	Sfera
		ISO 10360-2	25 punti
		VDI/VDE 2617-9	5 punti per ciascuna sfera con 5 orientamenti del polso
		Errore T_{ij} in scansione	ISO 10360-4
Campione	ISO 10360-4	Anello	
		Sfera	
Errore di posizione PL	Errore		Deviazione massima delle coordinate di un punto
	SPAT	B89.4.22	Cono
			3 sfere
			Foro smussato
	VDI/VDE 2617-9	Sfera con 10 distanze per 3 posizioni	
Errore di dimensione PS	Errore		Diametro della sfera
	Campione	VDI/VDE 2617-9	sfera
		VDI/VDE 2617-3	anello
		ISO 10360-2	Sfera
		B89.4.22	Sfera

Tabella 3-2 - Pianificazione dell'attività sperimentale del braccio articolato

Errore valutato		Riferimento normativo (se contemplato)	Hp Scelte
Errore di dimensione SD	Campione	VDI/VDE 2634-2	Ball bar
		ISO 10360-7	anello
	Numerosità e dimensioni dei campioni	VDI/VDE 2634-2	1 ball bar
		ISO 10360-7	
	Posizione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	7 posizioni
		ISO 10360-7	
	Orientazione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	Come figura
		ISO 10360-7	
	Misure	VDI/VDE 2634-2	1 scansione per posizione
ISO 10360-7			
Elementi geometrici da ricavare		Sfera di best fit ai minimi quadrati	
Errore di forma o tastatura R	Errore	VDI/VDE 2634-2	R
	Campione	VDI/VDE 2634-2	Sfera
		Costruttore FARO	Cilindro
	Posizione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	10 posizioni
Costruttore FARO		Non specificata	
Errore di planarità R_E	Errore	VDI/VDE 2634-2	R_E
	Campione	VDI/VDE 2634-2	Piano
	Posizione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	6 posizioni
	Orientazione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	Come in figura
	Numerosità e dimensioni dei campioni	VDI/VDE 2634-2	1piano di lunghezza non inferiore a 1/2 della diagonale più piccola del volume di misura
Risoluzione in Z	Campione		Piano con gradini
Precisione in Z	Campione		Piano con gradini

Tabella 3-3 - Pianificazione dell'attività sperimentale del laser

3.4.1 Sistema integrato

Dopo aver considerato le verifiche delle prestazioni per gli strumenti braccio articolato di misura e laser separatamente, si passa all'integrazione dello strumento ottico nel braccio. Con le due distinte procedure di taratura si è avuta la possibilità di evidenziare eventuali problematiche o anomalie della strumentazione, pertanto le due tipologie di strumento hanno già avuto un modo di verifica delle prestazioni.

Quello che si cercherà di fare ora è valutare la congruenza delle misure con i due metodi di misura: a contatto, con la sonda da 6 mm, e in scansione laser.

In Appendice D la norma ISO 10360-7, che si riferisce a macchine di misura a coordinate che integrano sistemi non a contatto, raccomanda di verificare le lunghezze con entrambi i metodi e di variare gli artefatti da quelli utilizzati nelle prove di verifica delle prestazioni.

Considerata la normativa presente e in particolare le norme ASME B89.4.22 e VDI/VDE 2617-9, si ipotizza di utilizzare 2 ball bar di diametri e distanze differenti, per confrontare le prestazioni dello strumento braccio di misura con integrato un laser.

In Tabella 3-4 è presente la definizione dell'ipotesi di una procedura per confrontare i risultati di misure effettuate con strumenti diversi.

Si ipotizza di utilizzare due ball bar, previste dalle norme relative ad entrambi i sistemi di misura, per effettuare il confronto tra i due sistemi di misura.

Le sfere vengono posizionate in un numero sufficienti di zone del volume di lavoro e misurate da entrambe le sonde. Si calcolano poi le sfere con il metodo dei minimi quadrati e vengono confrontati i seguenti errori:

- errore di posizione: range maggiore tra le coordinate dei centri
- errore di dimensione: massima deviazione tra i diametri misurati
- errore di forma: massima deviazione radiale dei punti della sfera di best fit
- errore di indicazione: massima differenza tra le lunghezze misurate.

Parametro	Norma di riferimento	Braccio	Norma di riferimento	Laser
Campione	ASME B89.4.22	2 Ball bar	VDI/VDE 2634-2	2 Ball bar
Strategia di misura	ASME B89.4.22	Sfere misurate per 9 punti	VDI/VDE 2634-2	Sfera in scansione
Parametri di misura	VDI/VDE 2617-9	5 orientamenti diversi del tastatore		rimanendo il più possibile ortogonale alla superficie
Posizioni del campione	ASME B89.4.22	A 1/2 del Raggio del braccio		
Numero di posizioni	ISO 10360-2	7 posizioni	ISO 10360-7 o VDI/VDE 2634-2	7 posizioni
Orientazioni del campione	ASME B89.4.22	Secondo layout di Figura 1-15	VDI/VDE 2634-2	Secondo layout di Figura 2-26
Parametri valutati	VDI/VDE 2617-9	Errore di posizione PL		Errore di posizione PL
	VDI/VDE 2617-9	Errore di dimensione PS	VDI/VDE 2617-6.2 VDI/VDE 2634-2	Errore di dimensione PS o SD
	VDI/VDE 2617-9	Errore di forma PF	VDI/VDE 2617-6.2	Errore di forma PF
	ASME B89.4.22 o VDI/VDE 2617-9	Errore di indicazione E	VDI/VDE 2617-6.2	Errore di indicazione E
Elemento associato		Sfera di best fit ai minimi quadrati		Sfera di best fit ai minimi quadrati

Tabella 3-4 - Ipotesi di confronto tra sistema a contatto e non a contatto

3.5 Conclusioni

In questo capitolo si è proposta una ipotesi di procedura per la verifica delle prestazioni di un braccio articolato di misura che integra un sistema di scansione laser.

Questa è stata effettuata sulla base della normativa vigente relativa ai bracci di misura e ai sistemi di visione. Infatti la campagna di prove si propone di valutare l'applicabilità delle norme a disposizione per la taratura delle macchine di misura a coordinate, con particolare riguardo ai bracci di misura articolati, e dei sistemi ottici che sfruttano il principio della triangolazione.

Si precisa che per sistemi che integrano un sistema laser ad un braccio articolato non c'è ancora nulla nel panorama normativo internazionale.

Per questo l'ipotesi fatta prevede una valutazione iniziale dei parametri caratteristici del braccio e del laser separatamente, per arrivare ad una proposta di misura per il confronto delle misure effettuate con i due sistemi di acquisizione.

Lo scopo iniziale è stato quello di definire i campioni da utilizzare, la numerosità delle prove da effettuare e le strategie di misura, per arrivare alla determinazione dei parametri caratteristici di tali strumenti e, infine, alla stesura di una serie di procedure operative per l'esecuzione della verifica.

Sarà la campagna sperimentale presentata nel capitolo seguente a confermare o meno le scelte ipotizzate in questa fase.

4 Capitolo 4 - Validazione della procedura

4.1 Introduzione

La campagna sperimentale svolta e di seguito descritta è stata progettata con l'intenzione di validare la procedura di taratura elaborata, mirando anche a studiare il comportamento del braccio di misura con integrato un sistema ottico a scansione, in condizioni operative reali. Tale campagna sperimentale ha consentito di avere una buona conoscenza dei fattori che influenzano le misure e che pertanto devono essere tenuti sotto controllo. Occorre distinguere gli errori commessi dal braccio, di cui si vuole informare l'utente, da errori di altro tipo, che alterano i risultati compromettendone l'utilità. Al fine di garantire la validità e la completezza informativa della procedura di taratura, occorre operare alcune scelte fra le soluzioni e le modalità di misura disponibili e proposte dalla normativa.

Inoltre sono stati utilizzati differenti campioni e norme di riferimento. In ogni caso i campioni metrologici e gli strumenti di cui è previsto l'utilizzo sono rigorosamente definiti e descritti in Appendice 1.

La campagna sperimentale è inizialmente divisa in base alla tipologia dello strumento di misura (braccio e laser). Successivamente si è valutata una modalità di verifica delle prestazioni del sistema integrato, indagando i vari di errori relativi a misure dimensionali, di forma (o tastatura) e di posizione, seguendo lo schema ipotizzato nel capitolo precedente.

Pertanto la fase sperimentale ha previsto una serie di test, ciascuno dei quali ha permesso di definire le modalità di esecuzione e di valutare determinati parametri di influenza, in base allo scopo prefisso

4.2 Qualifica delle sonde

La qualifica delle sonde è il primo fattore di incertezza nelle misurazioni, in quanto l'errore dovuto ad una calibrazione eseguita non correttamente o a misure rilevate con sonde non calibrate influisce enormemente e negativamente nell'accuratezza dei dati. Infatti la precisione di misurazione dipende dalla calibrazione della sonda in condizioni ottimali: se la calibrazione della sonda è buona le misurazioni saranno accurate, in caso contrario le misurazioni saranno imprecise.

Sono state valutate la ripetibilità e di riproducibilità in fase di calibrazione e in particolare la ripetibilità è stata verificata effettuando dieci volte la calibrazione della sonda mantenendo il foro conico di taratura nella stessa posizione e a circa metà raggio del volume di lavoro del braccio, mentre la riproducibilità è stata effettuata modificando la posizione posizionando del cono di taratura in diverse zone dello spazio di lavoro.

Nella Tabella 4-1 sono riportati i valori di dieci calibrazioni effettuate nella stessa posizione e nella Tabella 4-2 viene valutata la riproducibilità della sonda a sfera. Il registro di calibrazione della sonda riporta i valori X, Y e Z, la deviazione standard e l'errore massimo.

Le coordinate X, Y, Z corrispondono alla posizione del centro della sonda a sfera nell'ultimo sistema di coordinate del giunto. Il valore 2σ è la deviazione di tutti i punti acquisiti durante la calibrazione, mentre la colonna Errore max indica lo spostamento del punto di maggiore spostamento. Per superare la calibrazione, questo valore deve essere inferiore alla specifica di precisione di un punto singolo.

Confrontando i valori X, Y e Z, ciascuno deve ripetersi entro la precisione del dispositivo, ossia il valore della semi differenza tra il valore massimo e quello minimo devono rientrare nella precisione dichiarata dal costruttore, che in questo caso è pari a $\pm 0,030$ mm.

Posizione	X	Y	Z	2σ	Errore max
1	-0,053	0,065	223,322	0,016	0,040
2	-0,052	0,072	223,319	0,019	0,045
3	-0,057	0,065	223,319	0,014	0,045
4	-0,051	0,064	223,328	0,018	0,040
5	-0,052	0,072	223,321	0,018	0,046
6	-0,051	0,078	223,319	0,021	0,044
7	-0,048	0,072	223,325	0,040	0,059
8	-0,056	0,080	223,311	0,023	0,034
9	-0,060	0,075	223,316	0,027	0,052
10	-0,059	0,071	223,315	0,020	0,050
max	-	-	-	0,040	0,059
(max-min)/2	0,006	0,008	0,009	-	-

Tabella 4-1 - Ripetibilità calibrazione sonda a contatto

Posizione	X	Y	Z	2σ	Errore max
1	-0,050	0,075	223,321	0,019	0,041
2	-0,060	0,078	223,323	0,028	0,041
3	-0,052	0,079	223,329	0,023	0,038
4	-0,055	0,064	223,324	0,018	0,041
5	-0,048	0,061	223,318	0,021	0,051
6	-0,053	0,068	223,328	0,023	0,050
7	-0,051	0,073	223,322	0,020	0,050
8	-0,053	0,067	223,327	0,020	0,042
9	-0,051	0,074	223,318	0,018	0,062
10	-0,051	0,070	223,333	0,020	0,039
max	-	-	-	0,028	0,062
(max-min)/2	0,006	0,009	0,008	-	-

Tabella 4-2 - Riproducibilità calibrazione sonda a contatto

Questa valutazione è la prova S.P.A.T. prevista dalla norma B89.4.22, che valuta la precisione di un singolo punto. È per tale motivo che nella procedura di taratura proposta non viene utilizzata, in quanto se la calibrazione, che dovrebbe essere effettuata regolarmente, non ha

esito positivo, questo è il primo segno che le prestazioni del braccio non rispecchiano le specifiche.

Per quanto riguarda la sonda laser si è voluta valutare l'influenza della sonda fissa nella taratura della sonda non a contatto.

La calibrazione della Laser Line Probe mediante il piano è stata eseguita mantenendo il piano nella stessa posizione rispetto al braccio ma cambiando i parametri di calibrazione della sonda a contatto.

Oltre ai parametri già visti per la sonda a contatto ci sono anche gli angoli del codificatore A, B e C.

Posizione	X	Y	Z	A	B	C	2 σ	Errore max
1	-34,502	0,579	174,718	100,247	-99,112	100,635	0,029	0,068
2	-34,696	0,574	174,764	100,488	-99,075	100,430	0,031	0,078
3	-34,800	0,576	174,725	100,605	-99,059	100,329	0,030	0,072
4	-34,562	0,579	174,734	100,302	-99,109	100,582	0,030	0,082
5	-34,636	0,584	174,733	100,336	-99,158	100,500	0,031	0,078
6	-34,479	0,603	174,727	100,240	-99,104	100,649	0,030	0,072
7	-34,518	0,600	174,719	100,245	-99,124	100,624	0,030	0,070
8	-34,587	0,590	174,724	100,316	-99,122	100,556	0,032	0,076
9	-34,564	0,583	174,742	100,309	-99,104	100,581	0,029	0,074
10	-34,558	0,595	174,720	100,290	-99,104	100,600	0,036	0,077
max	-	-	-	-	-	-	0,036	0,082
(max-min)/2	0,160	0,015	0,023	0,183	0,050	0,160	-	-

La calibrazione del laser posizionando il piano in zone differenti del volume di lavoro ha dato una dispersione equivalente a quella sopra riportata.

Da queste prove preliminari si può dedurre che la ripetibilità e la riproducibilità della calibrazione delle sonde sono buone.

4.3 Misure di dimensione

I campioni proposti per la valutazione dell'errore di dimensione sono un set di blocchetti piano paralleli, la cui dimensione massima è pari a 500 mm, oppure una serie di ball bar, la cui dimensione massima, intesa come distanza tra i centri delle sfere, è pari a 246 mm.

La precisione della lunghezza volumetrica riferita al tastatore a contatto e riportata nel certificato di taratura del braccio è stata classificata come MPE_E , Errore Massimo Permissibile, per le misure di dimensione e utilizzata per confrontare gli errori ricavati dalle misure.

Per le misure non a contatto è stato utilizzato il valore di performance dichiarato dal costruttore, che è ottenuto sommando il dato relativo alla precisione del laser al valore della precisione volumetrica del braccio.

4.3.1 Sonda a contatto

Per quanto riguarda le misure di dimensione si sono valutate le norme ASME B89.4.22 che prevede l'utilizzo delle ball bar o barre bisfera, misurate in venti posizioni, e la norma VDI/VDE 2617-9, che si basa sulla ISO 10360-2 e che prescrive l'utilizzo di cinque campioni di lunghezza, che possono essere blocchetti piano paralleli o calibri a passi, collocati in sette posizioni diverse all'interno del volume di lavoro e misurati ciascuno tre volte.

Test su ball bar

Il test prende in esame tre ball bar, dette anche barre bisfera o manubri, con lunghezze differenti e sfere di diametri diversi. Per ogni campione, la sfera sinistra è contrassegnata con la lettera L, la sfera destra con R.

Le dimensioni nominali adottate sono le seguenti:

1. sfere di diametro pari a 30 mm e lunghezza pari a 58 mm
2. sfere di diametro pari a 55 mm e lunghezza pari a 130 mm
3. sfere di diametro pari a 85 mm e lunghezza pari a 253 mm

I dati di taratura sono riportati in Appendice 1.

Gli scopi della prova sono:

- ✓ verificare l'influenza della numerosità di punti tastati nel rilevamento delle sfere;
- ✓ scegliere le sfere più idonee fra quelle disponibili;
- ✓ studiare l'influenza dell'orientazione del tastatore;
- ✓ valutare l'utilità delle ball bar nelle misure di dimensione.

La lunghezza è stata ottenuta come distanza fra i centri delle sfere di regressione, ottenute a partire da 9 punti tastati su ogni superficie sferica, come previsto dalla B89.4.22.

Le sfere in ciascuna posizione e orientazione è stata rilevata tre volte con due orientazioni diverse del tastatore. La prima orientazione prevede il tastatore ortogonale alla distanza che dev'essere calcolata, mentre nella seconda il tastatore ha la stessa orientazione della distanza che sta misurando.

Questa seconda configurazione è più sfavorevole nel computo dell'errore che si sta valutando, poiché introduce in maniera preponderante l'errore di posizione dovuto alla tastatura.

In Tabella 4-3 sono riportati i valori medi del diametro delle sfere e il massimo scostamento dal nominale della distanza, che corrisponde all'errore di indicazione E, ed è calcolato come differenza tra valore misurato e valore di taratura.

Tutte le misure sono state ottenute collocando le barre in posizioni e a distanze diverse nel volume di lavoro del braccio, tuttavia si può affermare che l'errore di dimensione maggiore si ha nell'orientazione tangenziale lontana.

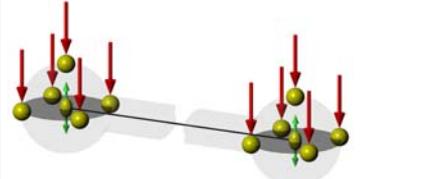
Orientazione tastatore	Diametro Sfera L	Diametro Sfera R	Errore di indicazione
	30,065	30,068	0,010
	55,061	55,129	-0,018
	85,789	85,788	0,023
	30,051	30,067	0,056
	55,014	55,118	0,068
	85,819	85,779	0,071

Tabella 4-3 - Valori medi dell'errore di indicazione su ball bar

I valori riportati mostrano come l'orientazione del tastatore influisca particolarmente nel calcolo della distanza, pertanto si sceglie l'orientamento che apporta il minimo contributo d'incertezza nel calcolo della distanza.

Aumentando il numero dei punti tastati sulla superficie sferica si nota un miglioramento del valore del diametro, che tende a diventare più preciso, mentre la distanza resta pressoché la stessa, indice che la posizione del centro delle sfere non varia.

Test su blocchetti piano paralleli

I campioni per le misure di dimensione prescritti dalla UNI EN ISO 10360-2 e dalla VDI/VDE 2617-3 sono i blocchetti piano paralleli.

La prova dimensionale preliminare è stata eseguita su un blocchetto piano parallelo di lunghezza pari a 500 mm, per poi estenderla a cinque lunghezze come previsto dalla ISO 10360-2. Si tratta del campione più lungo fra quelli a disposizione ed è stato scelto perché è quello che maggiormente mette alla prova la macchina, costringendola ad ampie rotazioni durante la prova di misura, e che introduce il maggior errore nel caso di un allineamento poco preciso.

Il test inizialmente si propone di:

- ✓ controllare la qualità delle misure in tutte le posizioni possibili all'interno del volume di lavoro;
- ✓ quantificare l'importanza del fissaggio dei campioni;
- ✓ stabilire la posizione più corretta che il braccio deve assumere durante la misura;
- ✓ verificare il metodo di allineamento tra quelli proposti.

Metodo di allineamento dei blocchetti

Sono stati sviluppati i metodi di allineamento e per ciascuno misurata la distanza tra le facce del blocchetto piano parallelo.

Tale distanza è misurata come differenza tra coppie di punti che si trovano nella zona centrale della faccia di misura.

I risultati della comparazione dei metodi descritti sono riportati nella Tabella 4-4. Sono riportati i valori medi delle distanze ottenuti nelle sette orientazioni previste dalla ISO 10360-2.

Orientazione e posizione	Allineamento		
	6P	3P-2p	3P-1p
1	499,966	499,989	499,987
2	499,939	499,992	500,001
3	499,989	499,980	499,982
4	500,003	500,033	500,003
5	499,989	499,985	499,965
6	499,992	500,024	499,978
7	499,996	500,020	499,981
max-min	0,064	0,053	0,038

Tabella 4-4 - Confronto tra i metodi di allineamento

Il metodo 6P-3p è stato scartato perché troppo laborioso e impossibile da realizzare nel caso di più blocchetti uniti da misurare contemporaneamente, poiché alcuni piani divengono irraggiungibili.

Inoltre un'eventuale scelta a favore di questo metodo non sarebbe stata giustificata dalla dispersione dei dati ottenuti.

Il metodo 3P-1p, pur essendo il più rapido e facile da realizzare, è stato scartato perché utilizza distanza tra singoli punti tastati.

Infatti i singoli punti, se non sono ottenuti come intersezione e/o costruzione da altri elementi geometrici, presentano un'elevata incertezza poiché non vengono compensati correttamente del raggio del tastatore a causa della non nota direzione di tastatura.

Per cui il metodo 3P-2p è stato preferito al 3P-1p perché allineato con la norma.

Il metodo di allineamento 3P-2p è stato successivamente rimesso in discussione, studiato e confrontato con altri fin qui non considerati, in particolare con l'allineamento 1P.

L'allineamento **1P** prevede la rilevazione di un solo piano, per mezzo di otto punti di tastatura, la cui normale fornisce il riferimento primario e un nono punto al centro di una faccia di misura, da utilizzare come origine. (Tabella 4-5)

L'allineamento 1P può dare risultati migliori se i punti su cui è creato il piano di riferimento sono disposti come in Figura 4-1.

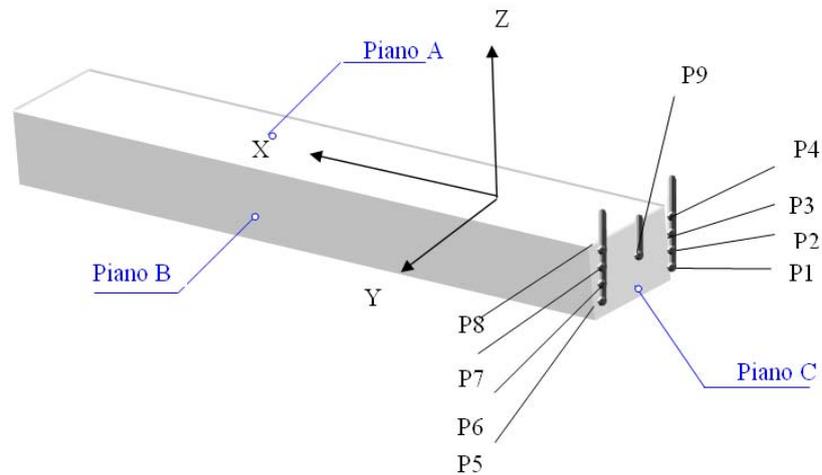


Figura 4-1 - Disposizione dei punti di tastatura sul piano di riferimento nel metodo di allineamento 1P

	DIREZIONE	ELEMENTO GEOMETRICO	N. PUNTI	DISTRIBUZIONE PUNTI
ASSE PRIMARIO	X	Piano (rif. C)	8	Vedere Figura 4-1
ASSE SECONDARIO	Y	-	-	-
ORIGINE	X	Piano (rif. C)	1	Vedere Figura 4-1
	Y	Piano (rif. C)	1	Vedere Figura 4-1
	Z	Piano (rif. C)	1	Vedere Figura 4-1

Tabella 4-5 - Schema del metodo di allineamento utilizzato

I metodi di allineamento 3P e 1P in linea di massima si equivalgono; in qualche caso si nota che il 3P conduce a misure più accurate ma meno precise, mentre quello che utilizza un solo piano di allineamento è preferibile in quanto a rapidità.

Il metodo di allineamento 1P, come già descritto, prevede di rilevare un unico piano di riferimento, dal quale vengono calcolate le distanze dei punti presi sulle facce di misura.

Strategia di misura adottata

La strategia di misura della lunghezza dei blocchetti con allineamento 1P ha subito una modifica rispetto alla strategia definita negli altri casi: essa consiste nel prendere una coppia di punti sulle opposte facce di misura, calcolare le distanze (con segno) L1 e L2 tra ogni punto e il piano su cui giace l'origine (vedere Figura 4-2), e sommare algebricamente queste ultime, per mezzo del foglio di calcolo. Con questa scelta si minimizza l'errore dovuto all'allineamento del campione poiché si introducono minori errori di allineamento. La somma dà la lunghezza misurata del blocchetto, che va poi confrontata con la lunghezza nominale per ricavare l'errore E.

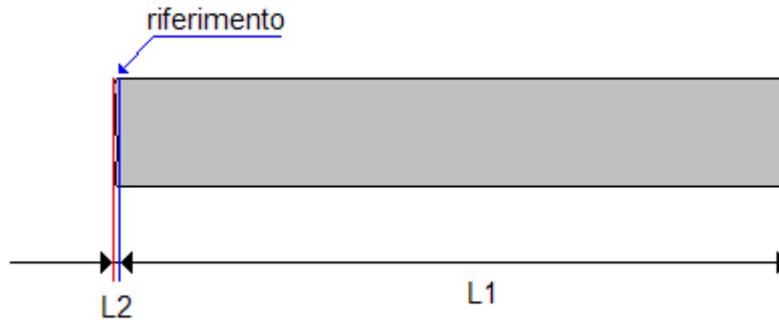


Figura 4-2 - Valutazione delle lunghezze per il calcolo della distanza

La norma ASME B89, alla quale il costruttore del braccio dichiara di allinearsi nel fornire l'MPE_E, prevede per misurazioni dimensionali l'utilizzo di barre con due sfere. Dalla campagna di misure descritta si è appurato che questo tipo di campioni non è il più adatto per eseguire una taratura, mentre lo sono i blocchetti piano paralleli, previsti dalle norme UNI EN ISO 10360-2 e VDI/VDE 2617-3.

Si vuole a questo punto, se possibile, allinearsi concettualmente al metodo di calibrazione usato dal costruttore, il quale misura una distanza fra punti costruiti geometricamente e non fra punti tastati. Viene allestito un nuovo metodo di misura che prevede, dopo l'allineamento, di rilevare due piani sulle facce di misura, con cinque punti equidistanti. Intersecati con l'asse principale del blocchetti, essi generano due punti al centro delle facce. Vengono calcolate le distanze tra questi e il piano di riferimento, che poi, sommate algebricamente, danno origine alla misura di lunghezza cercata.

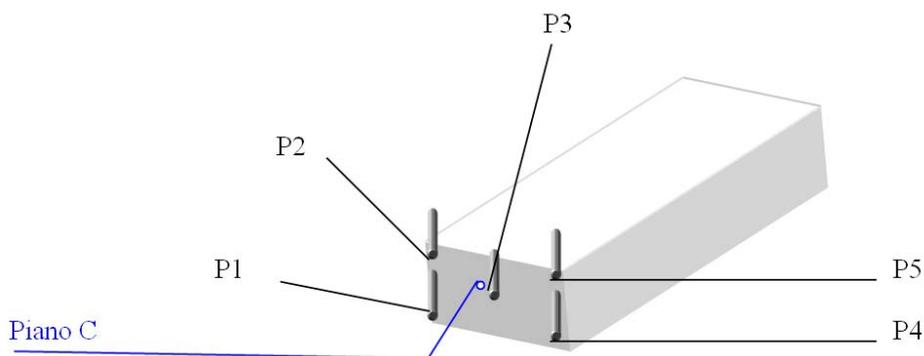


Figura 4-3 - Disposizione dei punti di tastatura sul piano di riferimento per la misura

La campagna di misura sul blocchetto di dimensioni nominali di 500 mm è stata condotta in sette posizioni del volume di lavoro. Come descritte nel Capitolo precedente le 7 posizioni previste dalla norma sono quelle radiale, tangenziale, verticale e diagonale.

L'analisi delle misure effettuate ha permesso di definire e progettare un sistema di fissaggio per i blocchetti piano paralleli che è mostrato in Figura 4-4. Tale sistema permette di orientare i blocchetti secondo quanto definito.

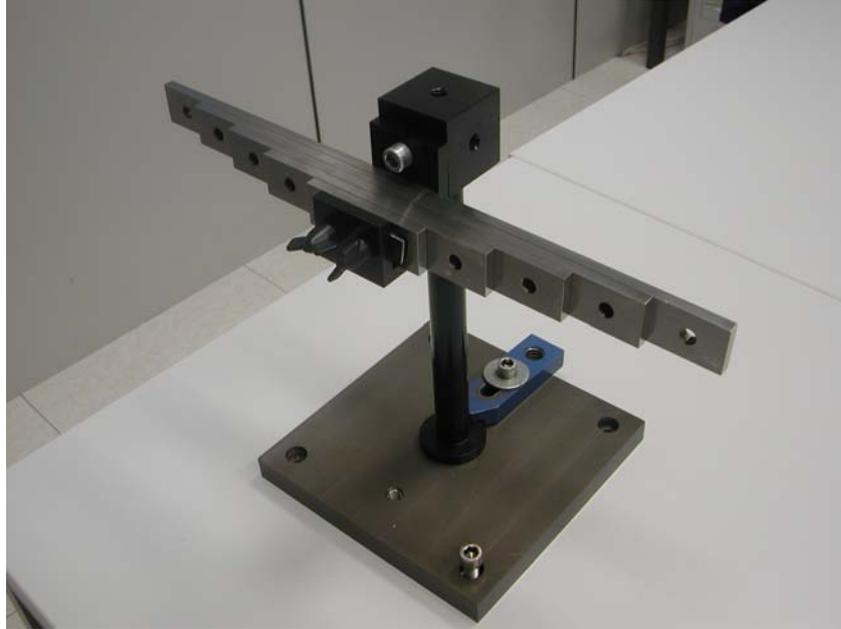


Figura 4-4 - Sistema di fissaggio dei blocchetti piano paralleli

Per quanto riguarda la strategia di misura si possono fare due ulteriori considerazioni. La prima riguarda l'orientazione del tastatore: l'acquisizione di una superficie con il tastatore normale ad essa dà una lunghezza misurata maggiore, se invece il tastatore è portato a contatto parallelamente alla superficie, cioè di taglio, è soggetto a flessione e viene rilevata una lunghezza minore del blocchetto.

È stato effettuato un test che mostra come la modalità di presa punto con tastatore parallelo, ortogonale o inclinato rispetto al piano di tastatura dà risultati molto diversi. I valori medi sono riportati nella Tabella 4-6.

L'orientazione parallela del tastatore dà complessivamente errori leggermente maggiori ma con una dispersione molto meno accentuata, e quindi è preferibile a quella ortogonale. Da sottolineare che non è possibile mantenere il tastatore ortogonale al piano in tutte le orientazioni dei campioni.

Poiché lo strumento è manuale, la misura è sicuramente influenzata dalla manualità dell'operatore e dalla forza di contatto.

L'operatore introduce un disturbo, indipendentemente dal modello di macchina, che può essere trascurabile per bracci con ampie tolleranze, o importante per tolleranze ristrette come nel caso di bracci molto accurati.

Posizione	Orientazione Tastatore	Errore Massimo [mm]	Errore Minimo [mm]	Deviazione standard
Radiale	Inclinato	0,030	-0,012	0,003
	Parallelo	0,020	-0,014	0,002
	Ortagonale	0,016	-0,017	0,005
Tangenziale	Inclinato	0,017	-0,014	0,002
	Parallelo	0,021	-0,019	0,004
	Ortagonale	0,015	-0,017	0,007
Verticale	Inclinato	0,030	-0,020	0,004
	Parallelo	0,063	-0,037	0,002
	Ortagonale	0,005	-0,039	0,006
Diagonale	Inclinato	0,027	-0,010	0,004
	Parallelo	0,017	-0,011	0,002
	Ortagonale	0,024	-0,038	0,005

Tabella 4-6 - Valori medi dell'errore per posizione, blocchetto e orientazione del tastatore

La seconda considerazione definisce da quale parte avvicinare per le misure. La scelta del lato su cui operare rientra nel problema del posizionamento e dipende di volta in volta dall'ubicazione del sistema di blocchetti: conviene avvicinare il campione dalla parte in cui i movimenti risultano più facili, sia per diminuire la difficoltà dell'operazione, sia per rendere minimo il contributo d'errore derivante da posizioni limite dello strumento.

Influenza della temperatura

Come già anticipato il sistema di misura utilizzato è in grado di compensare la temperatura, pertanto eventuali correzioni vanno applicate solamente ai campioni utilizzati.

Le misure sono avvenute in una sala metrologica che mantiene costantemente una temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e ha un'umidità controllata, pertanto le correzioni da apportare alla lunghezza nominale del blocchetto sono dell'ordine di centesimi di millimetro.

Utilizzando la relazione

$$\Delta L_{temp} = L_{tar} \cdot \alpha_r \cdot \Delta T$$

già enunciata nel capitolo precedente e togliendo il contributo della temperatura che causa la diversa lunghezza del campione, si ottengono gli errori compensati, come riportato in Tabella 4-7 e mostrato nei grafici di Figura 4-5 e Figura 4-6.

Per ciascuna posizione è riportato il valore medio della misurazione e la relativa compensazione della temperatura.

I due grafici confrontano i valori degli errori. Da evidenziare che le correzioni sono dell'ordine del micron, in quanto le misurazioni sono avvenute in una sala metrologica, per cui le differenze sono minime, poiché sono di un ordine di grandezza inferiore alla risoluzione dello strumento.

Nominale	Posizione	Rilevato [mm]	Errore [mm]	Temperatura [°C]	Δx_{Temp} [mm]	$E_{compensato}$ [mm]
100,000	1	99,986	-0,014	19,43	-0,001	-0,013
	2	99,986	-0,014	19,46	-0,001	-0,013
	3	99,986	-0,014	19,51	-0,001	-0,013
	4	99,998	-0,002	19,63	0,000	-0,002
	5	99,996	-0,004	19,61	0,000	-0,004
	6	100,001	0,001	19,58	0,000	0,001
	7	100,004	0,004	19,46	-0,001	0,005
200,000	1	199,981	-0,019	19,53	-0,001	-0,018
	2	199,975	-0,025	19,55	-0,001	-0,024
	3	199,982	-0,018	19,52	-0,001	-0,017
	4	200,001	0,001	19,63	-0,001	0,002
	5	200,001	0,001	19,68	-0,001	0,002
	6	200,007	0,007	19,73	-0,001	0,008
	7	200,003	0,003	19,41	-0,001	0,004
i300,000	1	299,986	-0,014	19,34	-0,002	-0,012
	2	299,988	-0,012	19,37	-0,002	-0,010
	3	299,989	-0,011	19,40	-0,002	-0,009
	4	300,003	0,003	19,73	-0,001	0,004
	5	300,010	0,010	19,77	-0,001	0,010
	6	300,011	0,011	19,81	-0,001	0,011
	7	300,008	0,008	19,38	-0,002	0,010
400,000	1	399,986	-0,014	19,38	-0,003	-0,011
	2	399,984	-0,016	19,36	-0,003	-0,013
	3	399,988	-0,012	19,34	-0,003	-0,009
	4	400,015	0,015	19,81	-0,001	0,016
	5	400,013	0,013	19,82	-0,001	0,014
	6	400,017	0,017	19,83	-0,001	0,018
	7	400,010	0,010	19,31	-0,003	0,013
500,000	1	499,996	-0,003	19,43	-0,003	0,000
	2	499,986	-0,014	19,40	-0,003	-0,010
	3	499,993	-0,007	19,38	-0,004	-0,003
	4	500,026	0,026	19,83	-0,001	0,027
	5	500,020	0,020	19,81	-0,001	0,022
	6	500,022	0,022	19,79	-0,001	0,024
	7	499,997	-0,003	19,38	-0,004	0,001

Tabella 4-7 - Compensazione della temperatura

Errore di indicazione per misure di dimensioni E non compensati della temperatura

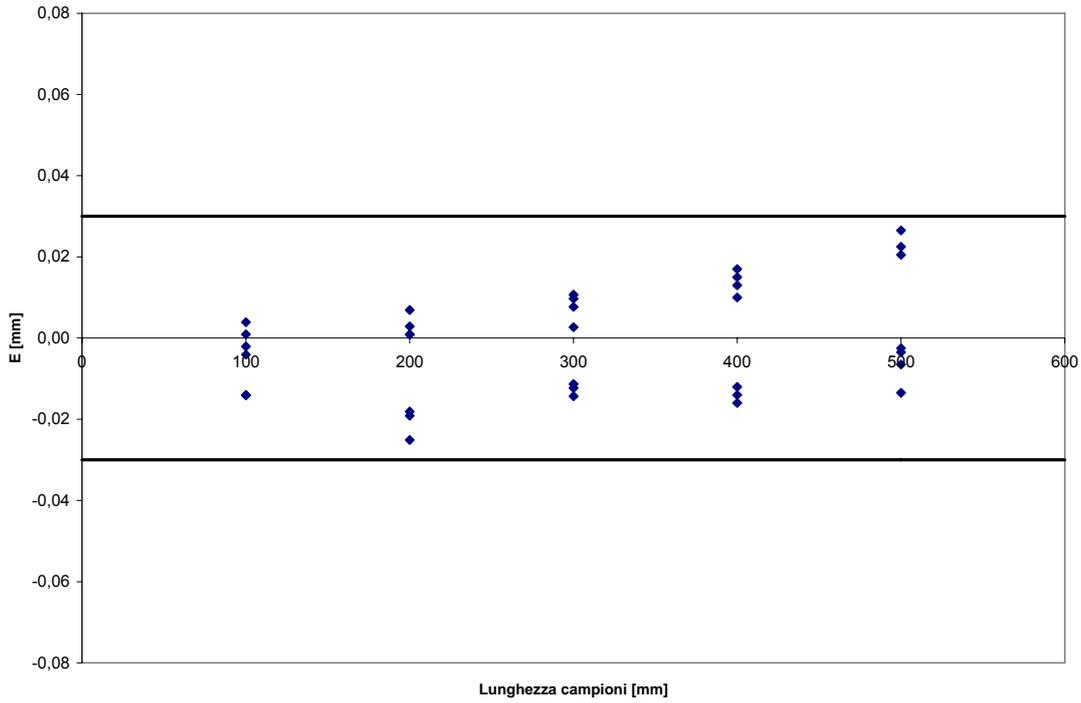


Figura 4-5 - Valori non compensati della temperatura

Errore di indicazione per misure di dimensioni E compensati della temperatura

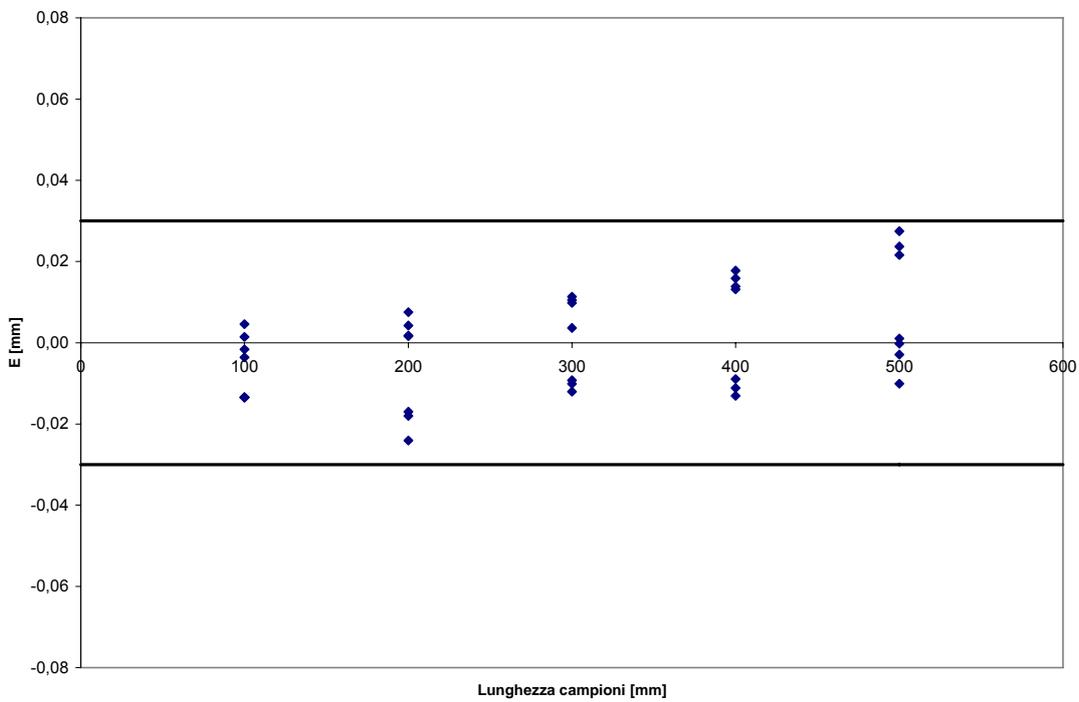


Figura 4-6 - Valori compensati della temperatura

Posizioni critiche

Si è potuto determinare che tendenzialmente le misure condotte nelle posizioni tangenziali sono affette da errori maggiori rispetto alle altre. Questo è evidente nei grafici di Figura 4-9. Questo può essere dovuto alla mancata precisione angolare dello strumento. Infatti per uno strumento di questo tipo è importante avere una precisione molto elevata sullo spostamento angolare poiché ogni errore angolare influenza direttamente il risultato finale e aumenta proporzionalmente all'aumentare della distanza. È per questo che tale errore è particolarmente evidente nelle misure di distanze con i campioni orientati tangenzialmente al braccio. Il braccio in queste posizioni è sottoposto a rotazioni che gli encoder misurano in modo più impreciso.

Gli errori più bassi, invece, sono riscontrabili nella posizione radiale, poiché i giunti che intervengono nella misurazione compiono movimenti simili e limitati, senza particolari rotazioni.

In generale, se il campione è posto in zone a ridosso del limite del volume di lavoro, vicine o lontane dalla base del braccio, le operazioni di allineamento e di misura sono affette da errori maggiori, perché la macchina è costretta a lavorare in condizioni critiche (giunti rotanti a fine corsa, encoder a fondo scala, sbracci elevati o in casi estremi tensioni lungo il braccio).

Per concludere, i risultati di tali prove sono stati:

- ✓ definizione di un metodo di allineamento e di misura dei blocchetti che minimizza l'influenza del tastatore e introduce la minor incertezza di misura;
- ✓ valutare la qualità delle misure eseguite secondo la norma UNI EN ISO 10360-2 per il calcolo dell'errore di indicazione per misure dimensionali;
- ✓ individuare le posizioni e le orientazioni dei campioni per il braccio di misura, valutando quelle più critiche;
- ✓ validare una procedura per le verifiche dimensionali di un braccio articolato di misura e rendere tali dati leggibili e confrontabili in un grafico
- ✓ introdurre la compensazione della temperatura.

Pertanto si può affermare che il campione che meglio interpreta ed evidenzia l'errore dimensionale è il blocchetto piano parallelo, quindi saranno utilizzati questi campioni per la verifica delle prestazioni dimensionali della sonda a contatto.

Come MPE_p , Errore Massimo Permissibile è stato utilizzato il valore della precisione volumetrica presente nel certificato di taratura di ogni braccio e definito dal costruttore.

7] verticale

Asse maggiore dei 5 blocchetti disposto verticalmente.

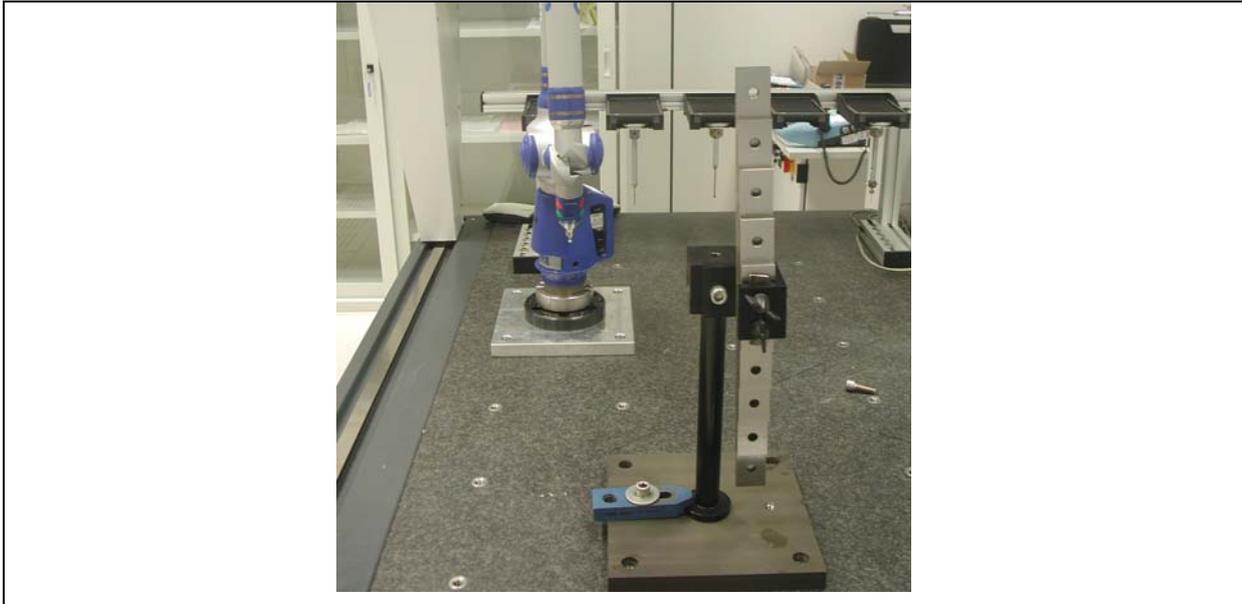


Figura 4-7 sono riportati i posizionamenti dei blocchetti piano paralleli per ciascuna orientazione e in Figura 4-8 è indicata la distribuzione degli stessi nel volume di lavoro del braccio di misura.

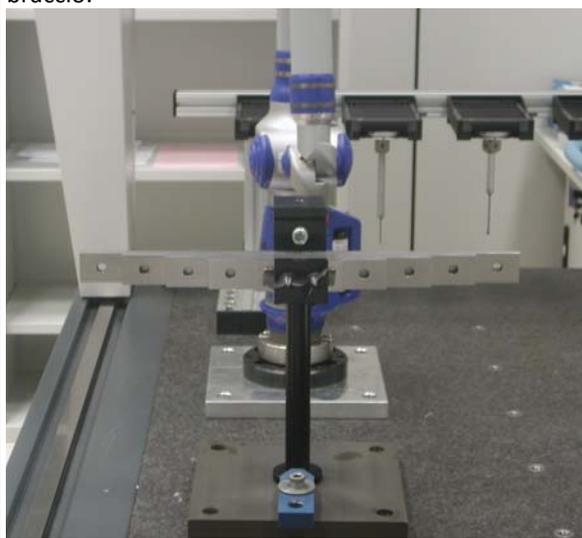
1] radiale vicina

Asse maggiore dei 5 blocchetti radiale rispetto al volume di lavoro, disposto in posizione vicina alla base del braccio.



2] tangenziale vicina

Asse maggiore dei 5 blocchetti tangenziale rispetto al volume di lavoro, in posizione vicina alla base del braccio.



3] radiale lontana

Asse maggiore dei 5 blocchetti radiale rispetto al volume di lavoro, disposto in posizione lontana rispetto alla base del braccio.



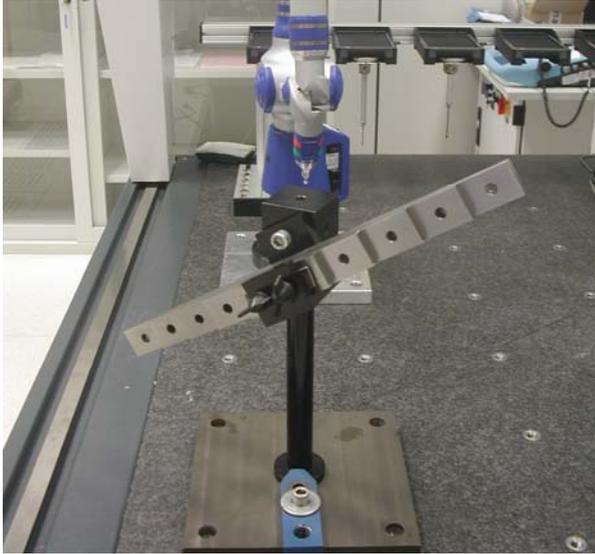
4] tangenziale lontana

Asse maggiore dei 5 blocchetti tangenziale rispetto al volume di lavoro, disposto in posizione lontana rispetto alla base del braccio.



5] diagonale vicina

Asse maggiore dei 5 blocchetti disposto obliquamente in posizione vicina alla base del braccio, inclinato di 45° rispetto alla direzione radiale sia in orizzontale che in verticale.



6] diagonale lontana

Asse maggiore dei 5 blocchetti disposto obliquamente in posizione lontana dalla base del braccio, ruotato sia verticalmente che orizzontalmente di 90° rispetto alla posizione 5].



7] verticale

Asse maggiore dei 5 blocchetti disposto verticalmente.

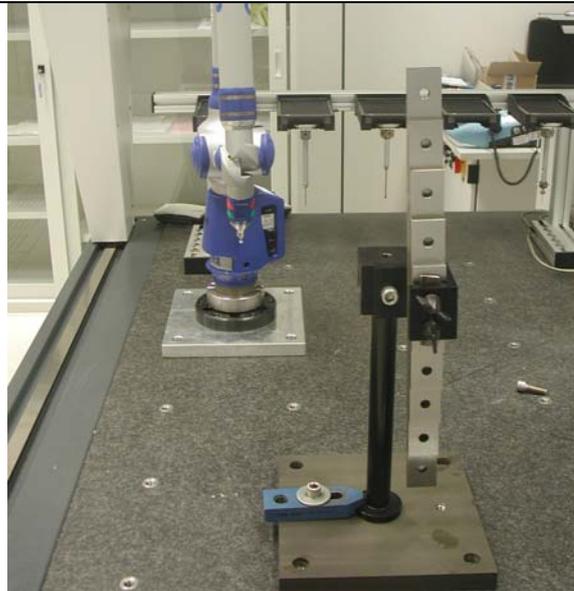


Figura 4-7 - Posizione dei campioni di lunghezza nelle 7 orientazioni

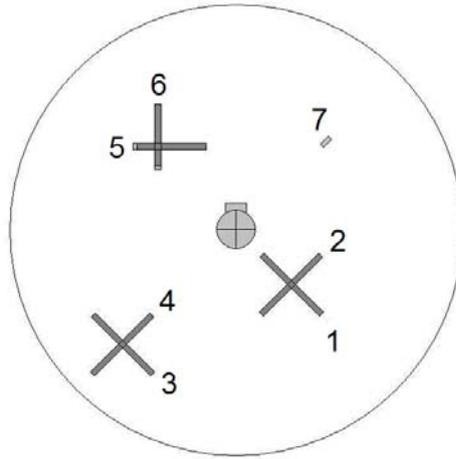


Figura 4-8 - Posizione dei campioni di lunghezza nel volume di misura

Quindi con riferimento alla procedura di taratura del braccio di misura mediante l'utilizzo dei blocchetti si riportano i sette grafici relativi alle singole posizioni nel volume di lavoro per le cinque lunghezze che riassumono la procedura di verifica delle prestazioni dimensionali di un braccio articolato:

- Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo l'asse X, in posizione lontana al supporto del braccio; posizione tangenziale lontana (Figura 4-9);
- Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo l'asse X, in posizione vicina dal supporto del braccio; posizione tangenziale vicina (Figura 4-10);
- Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo l'asse Y, in posizione lontana al supporto del braccio; posizione radiale lontana (Figura 4-11);
- Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo l'asse Y, in posizione vicina dal supporto del braccio; posizione radiale vicina (Figura 4-12);
- Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo l'asse Z; posizione verticale (Figura 4-13);
- Errore di indicazione per misure di dimensioni E nello spazio in posizione lontana dal supporto del braccio; posizione diagonale lontana (Figura 4-14);
- Errore di indicazione per misure di dimensioni E nello spazio in posizione vicina dal supporto del braccio; posizione diagonale vicina (Figura 4-15).

I valori riportati nei grafici sono già compensati dagli effetti della temperatura e tutti espressi in millimetri.

Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo asse X in posizione lontana

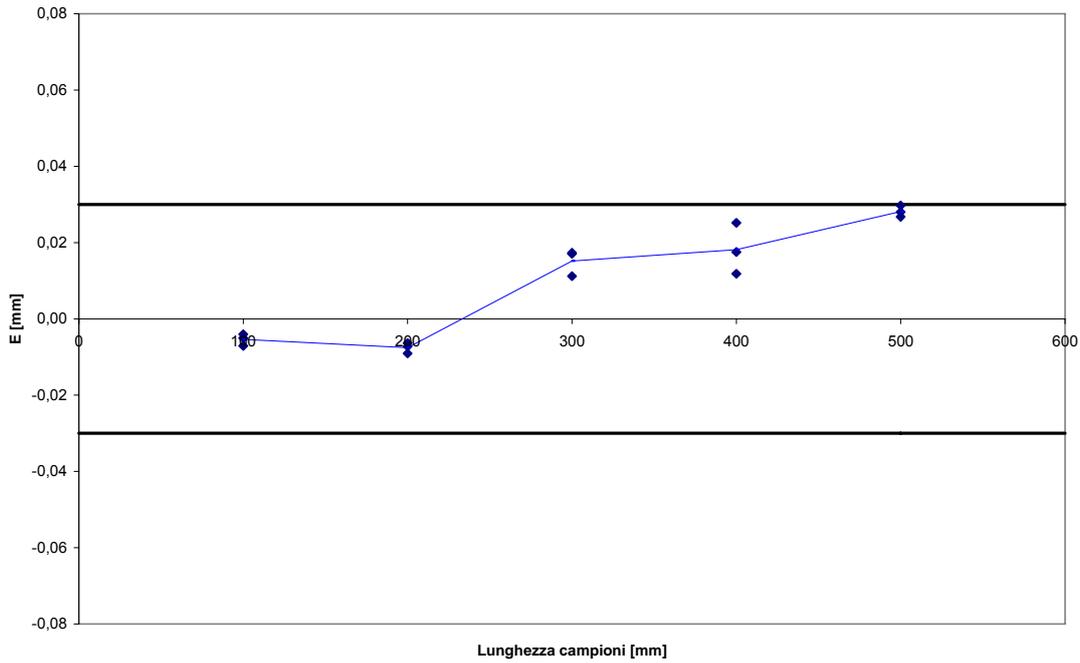


Figura 4-9 - Errore di indicazione in posizione tangenziale lontana

Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo asse X in posizione vicina

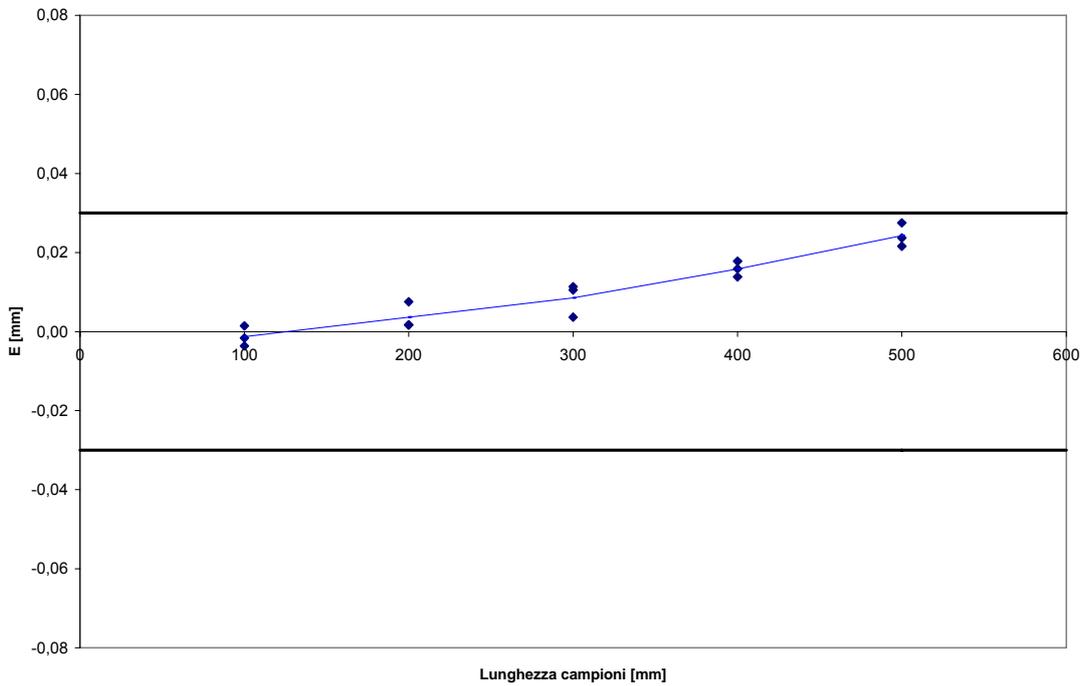


Figura 4-10 - Errore di indicazione in posizione tangenziale vicina

Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo asse Y in posizione lontana

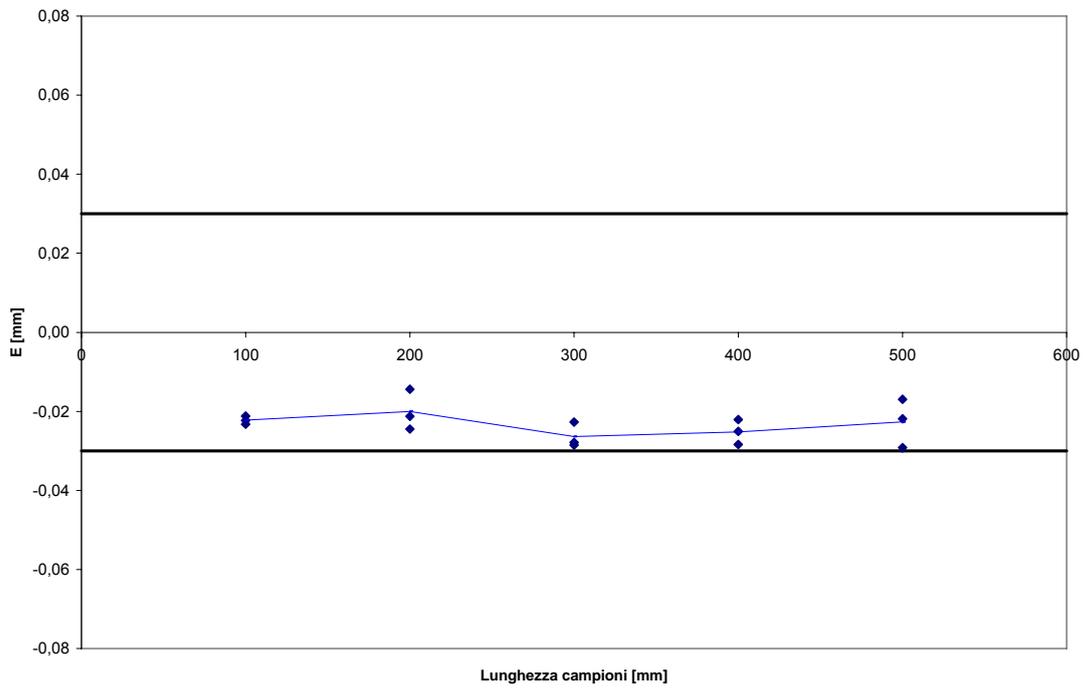


Figura 4-11 - Errore di indicazione in posizione radiale lontana

Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo asse Y in posizione vicina

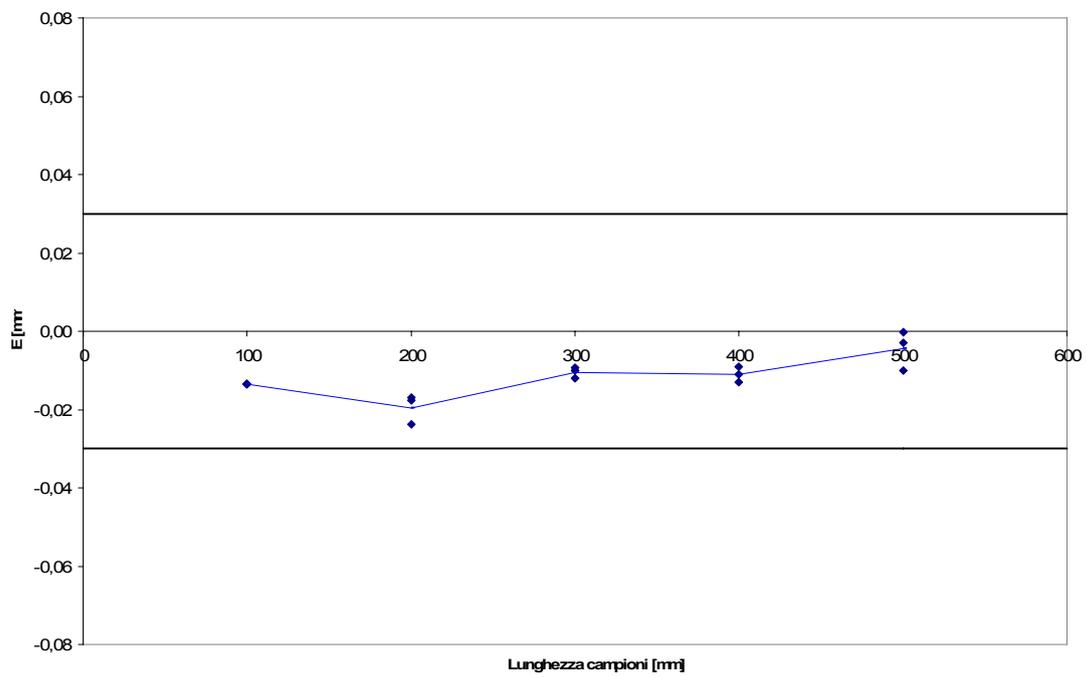


Figura 4-12 - Errore di indicazione in posizione radiale vicina

Errore di indicazione per misure di dimensioni E lungo asse Z

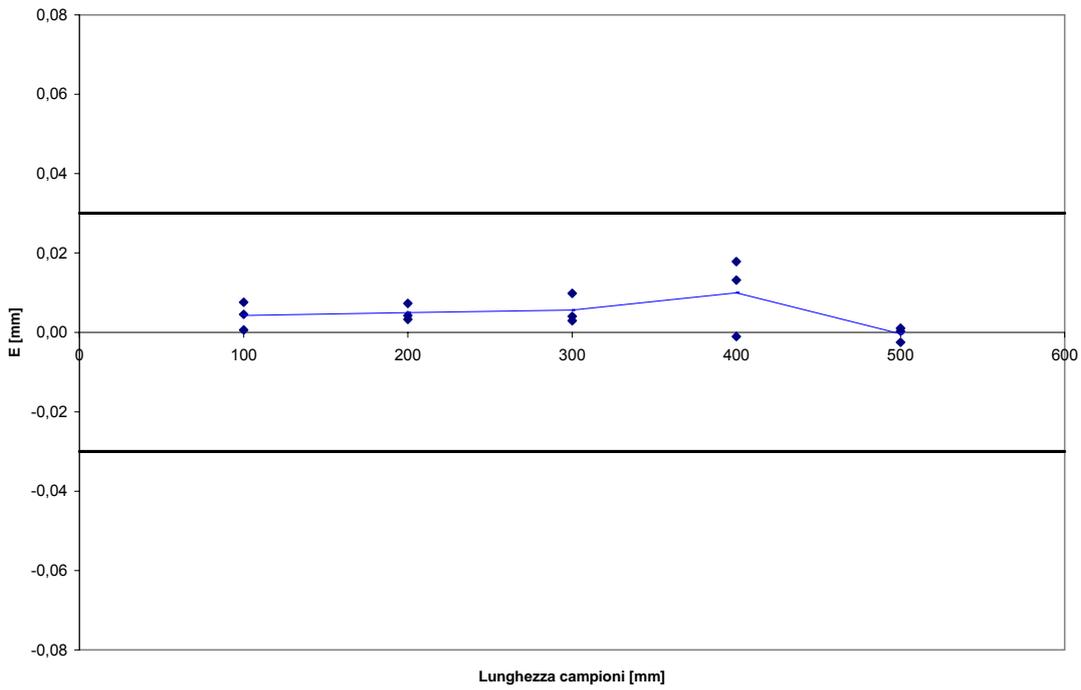


Figura 4-13 - Errore di indicazione in posizione verticale

Errore di indicazione per misure di dimensioni E nello spazio in posizione lontana

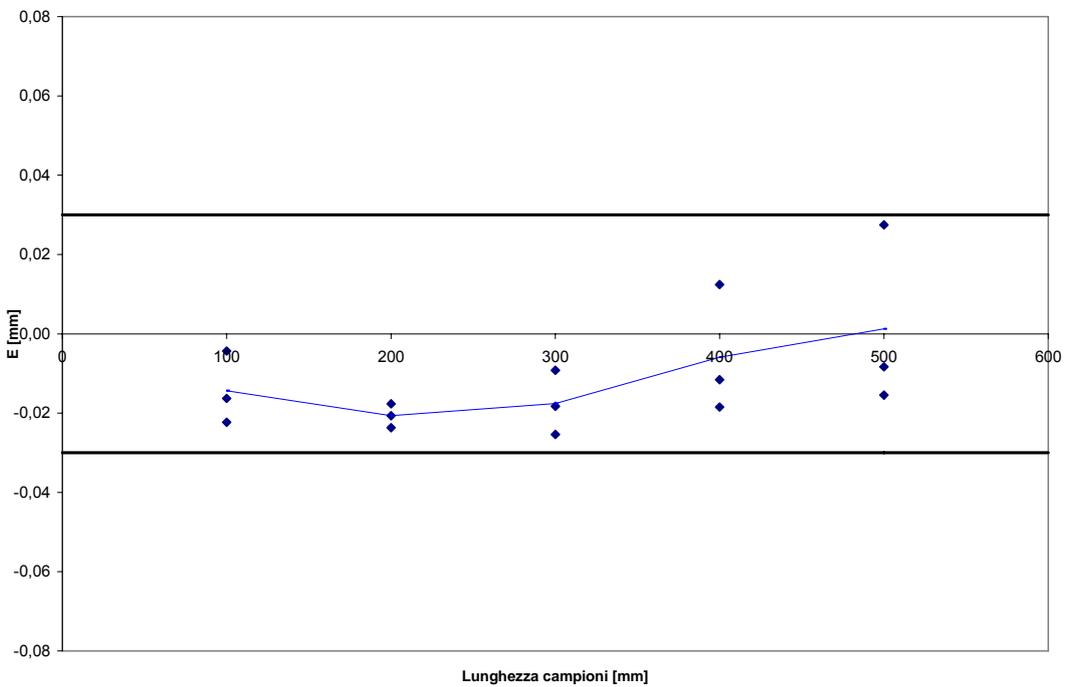


Figura 4-14 - Errore di indicazione in posizione diagonale lontana

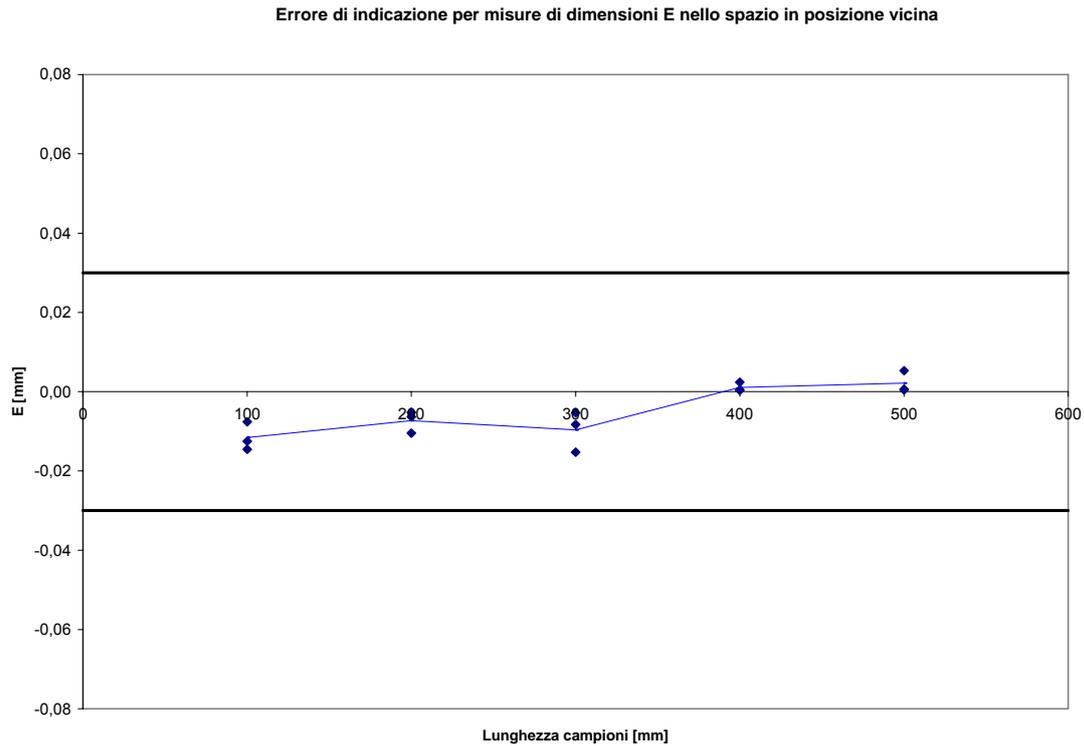


Figura 4-15 - Errore di indicazione in posizione diagonale vicina

4.3.2 Sonda non a contatto

La norma tedesca VDI/VDE 2634 prevede, per la valutazione dell'errore di dimensione dei sistemi di misura ottici, l'utilizzo di ball bar, chiamate anche manubri, posizionate in sette zone del volume di lavoro.

Per determinare il parametro di qualità SD (errore di spaziatura tra le sfere) vengono calcolate le sfere di best fit con raggio dato, in accordo con il metodo dei minimi quadrati. Note le posizioni nello spazio 3D dei centri, è possibile calcolare la loro distanza reciproca.

La prova è stata effettuata sulle sfere di diametro nominale pari a 55 mm ed è stata valutata la distanza tra i centri.

La ball bar è stata posizionata sia tangenzialmente che radialmente alla base del braccio.

I valori sono riportati nei grafici di Figura 4-16 e di Figura 4-17.

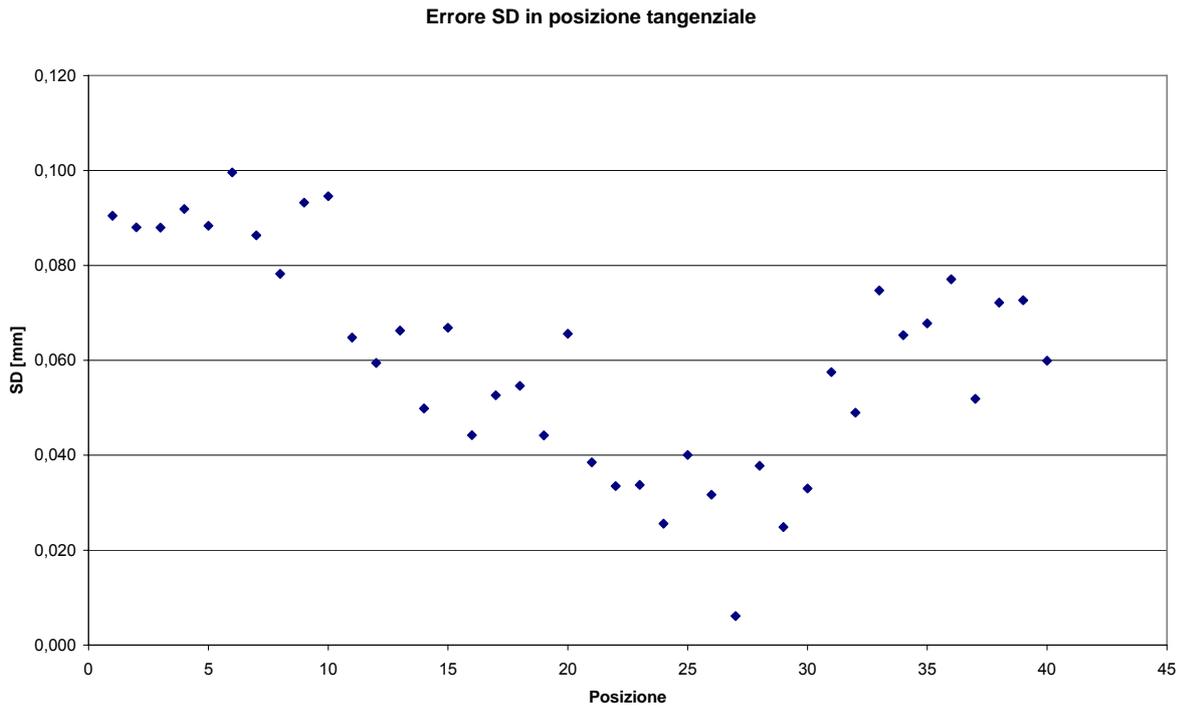


Figura 4-16 - Errore di dimensione SD in posizione tangenziale

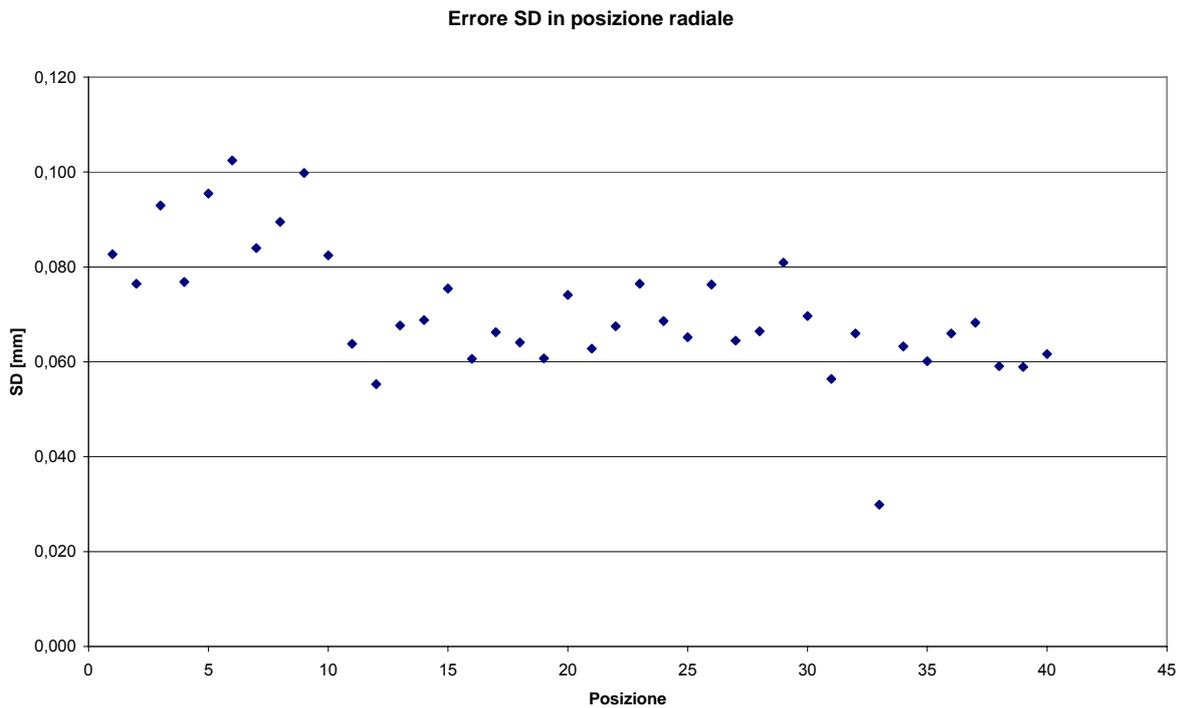


Figura 4-17 - Errore di dimensione SD in posizione radiale

L'utilizzo di ball bar non è propriamente adatto alla valutazione dell'errore di dimensione poiché non è valutabile la precisione del laser indipendentemente dall'accuratezza del braccio. Questo perché per effettuare la scansione della sfera e mantenere il sistema ottico il più possibile ortogonale alla superficie da scansione l'articolazione del braccio interviene prevalentemente.

Infatti nel confronto tra i grafici si può vedere che la precisione della misura aumenta con il diminuire della distanza dalla base del braccio qualora la ball bar si trovi in posizione tangenziale.

Il confronto tra i dati così ottenuti con quelli della sonda a contatto sarà oggetto della possibile integrazione tra i due sistemi di misura e presentati in § 4.5.

Si esclude l'utilizzo dei blocchetti piano paralleli per la valutazione dell'errore di dimensione poiché sono in acciaio e non adatti ad essere scansionati per la riflettività del materiale. E in questo caso non è consigliato utilizzare un spray opacizzante.

4.4 Misure di forma

I campioni proposti dalla normativa per la valutazione dell'errore di dimensione sono una sfera o un nello, entrambi tarati in dimensione e forma.

Per quanto riguarda il tastatore a contatto il valore della ripetibilità da test sul cono (S.P.A.T.), presente nel certificato di taratura del braccio e definito dal costruttore, è stato utilizzato come MPE_p , Errore Massimo Permissibile, nella valutazione ed elaborazione dei dati per le misure di tastatura, tastatura in scansione, ripetibilità e ripetibilità in scansione, mentre la ripetibilità da test su sfera a singolo punto non è stata utilizzata.

4.4.1 Sonda a contatto

Test su sfere

Il test ha per oggetto la misura delle sfere delle ball bar descritte in Appendice 1.

La prova ha lo scopo di:

- ✓ Verificare l'influenza della numerosità dei punti tastati nel rilevamento
- ✓ Scegliere le sfere più idonee tra quelle disponibili
- ✓ Valutare l'idoneità della sfera nelle misure dell'errore di tastatura e di posizione e l'idoneità della ball bar nelle misure di dimensione, come previsto dalla Norma
- ✓ Valutare la disposizione delle ball bar
- ✓ Definire l'orientazione del tastatore durante la presa punto.

La norma B89.4.1:1995 prevede per il calcolo dell'errore di ripetibilità la rilevazione di 10 sfere costruita ciascuna con 4 punti. Il massimo errore è dato dalla massima ampiezza fra i dieci centri di regressione, lungo ogni asse coordinato: assiale, radiale e verticale.

Le sfere sono state tastate con due orientazioni del tastatore: nella prima orientazione (1) il tastatore è disposto ortogonalmente all'asse della ball bar, come mostrato in Figura 4-18 , mentre nella seconda orientazione (2) il tastatore è disposto parallelamente all'asse della ball bar (Figura 4-19).

Questo è di importanza rilevante non tanto per il calcolo del diametro o della ripetibilità del posizionamento, quanto nel calcolo delle distanze. Infatti nel primo caso l'errore dovuto al

posizionamento del centro della sfera rilevata è trascurabile rispetto alla tastatura del secondo caso.

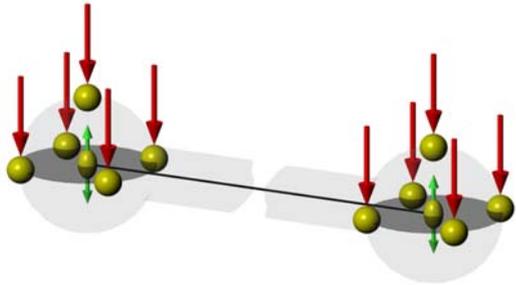


Figura 4-18 - Orientazione (1) del tastatore nella presa punti della sfera

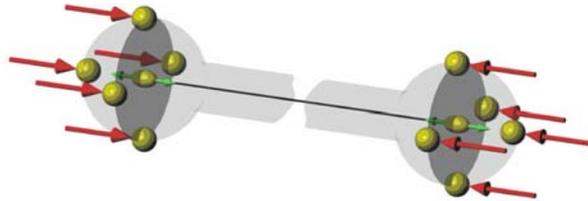


Figura 4-19 - Orientazione (2) del tastatore nella presa punti della sfera

In Tabella 4-8 si riporta il massimo dei valori dell'errore di ripetibilità, espresso come ΔRad , ΔTang e ΔVert , per ciascuna sfera della ball bar.

La ball bar in questa prima fase sperimentale è stata posta sempre in posizione radiale al braccio di misura.

Per completezza accanto all'errore di ripetibilità è stato riportato anche l'errore dimensionale sul diametro calcolato come la media di tutti gli errori E_d , come previsto dalla B89.4.22:

$$E_d = D_{\text{rilevato}} - D_{\text{nominale}}$$

Dove D_{rilevato} è il diametro della sfera di regressione e D_{nominale} è il diametro nominale del campione.

E_d è l'errore di indicazione per le misure dimensionale, e viene messo in relazione con l'MPE_E. Ciò che emerge da tali risultati è che la variabilità del diametro è elevata, e questo può dipendere dall'orientazione del tastatore, ma anche da un possibile problema di taratura del braccio, in quanto i giunti possono avere degli errori elevati.

	Errore	Ball bar D 30		Ball bar D 55		Ball bar D 85	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
L	ΔRad	0,027	0,012	0,015	0,019	0,011	0,020
	ΔTang	0,013	0,010	0,049	0,015	0,025	0,017
	ΔVert	0,024	0,006	0,080	0,038	0,039	0,048
	E_d	-0,007	-0,018	0,015	-0,032	-0,008	-0,026
R	ΔRad	0,031	0,011	0,039	0,009	0,018	0,007
	ΔTang	0,021	0,010	0,029	0,013	0,027	0,012
	ΔVert	0,023	0,018	0,053	0,033	0,018	0,012
	E_d	0,013	-0,016	0,006	-0,007	-0,019	-0,008

Tabella 4-8 - Ripetibilità sfera in posizione radiale

L'errore di dimensione, seppure affetto da mancanza di ripetibilità, è molto più contenuto di quello di tastatura e rientra nelle specifiche dichiarate dal costruttore del braccio.

Si vede, inoltre, come la direzione di tastatura influisca nell'errore di ripetibilità relativamente alla direzione corrispondente. Nella configurazione (2) l'errore di ripetibilità maggiore è generalmente quello nella direzione radiale, mentre nella configurazione (1) si ha un errore maggiore nella direzione verticale, in quanto il tastatore appropria dall'alto e la componente maggiore di errore quando viene costruita la sfera di best fit è proprio in tale direzione. Tale differenza di orientazione risulta molto evidente nel calcolo della distanza, già discussa nel § 4.3.1.

	Errore	Ball bar D 30		Ball bar D 55		Ball bar D 85	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
L	Δ Rad	0,019	0,011	0,052	0,050	0,022	0,021
	Δ Tang	0,012	0,018	0,024	0,036	0,018	0,020
	Δ Vert	0,035	0,043	0,026	0,040	0,014	0,016
	E_d	-0,014	-0,021	0,027	-0,011	0,026	0,001
R	Δ Rad	0,031	0,021	0,034	0,027	0,025	0,014
	Δ Tang	0,014	0,019	0,016	0,021	0,016	0,015
	Δ Vert	0,018	0,015	0,010	0,008	0,017	0,007
	E_d	0,002	-0,011	-0,011	-0,007	-0,004	-0,011

Tabella 4-9 - Ripetibilità della sfera secondo norma B89 in posizione tangenziale

Per completezza si riporta che tale prova è stata condotta anche sulla ball bar con sfere di diametro pari a 15 mm di diametro, ma fin da subito è emersa la difficoltà di tastare le sfere con diametro così piccolo, anche se prevista dalla norma VDI/VDE 2617 Part 9, perciò la ball bar è stata immediatamente scartata.

Le sfere da 85 mm non presentano questo inconveniente, ma si allontanano troppo dalla normativa: la VDI/VDE 2617 Part 9 e la B89.4.22 prescrivono campioni di diametro non superiore a 50 mm e la VDI/VDE 2617 Blatt 3 consiglia diametri non oltre i 30 mm.

Pertanto sono state effettuate delle nuove misure utilizzando un numero maggiore di punti di campionamento sulle sfere di diametro di 30 e 55 mm, mantenendo le due orientazioni del tastatore adottate per le prove precedenti e le posizioni delle ball bar radiale e tangenziale.

Le sfere sono state rilevate con un numero di punti di tastatura pari a 25, come prescritto dalla UNI EN ISO 10360-2 e dalla VDI/VDE 2617 Part 9.

I risultati sono espressi nella Tabella 4-10. Oltre agli errori già visti, è stato aggiunto anche il valore medio dell'errore di forma. Infatti con 25 punti di tastatura tale errore comincia ad essere significativo e se troppo elevato diventa indice per la qualità delle rilevazioni. Infatti un errore di forma elevato può non dipende solamente dal campione utilizzato, ma anche da un problema al tastatore, che può essere da ri-calibrare o nella peggiore delle ipotesi da sostituire perché rovinato.

	Errore	Ball bar D 30 tangenziale		Ball bar D 30 radiale		Ball bar D 55 tangenziale		Ball bar D 55 radiale	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
L	Δ Rad	0,047	0,019	0,099	0,010	0,014	0,019	0,011	0,011
	Δ Tang	0,016	0,014	0,012	0,012	0,018	0,011	0,019	0,020
	Δ Vert	0,015	0,011	0,033	0,013	0,011	0,008	0,012	0,026
	E_d	0,009	-0,024	0,008	-0,015	0,012	-0,018	0,009	-0,030
	Forma	0,027	0,027	0,027	0,031	0,052	0,065	0,061	0,066
R	Δ Rad	0,100	0,031	0,092	0,036	0,009	0,026	0,038	0,006
	Δ Tang	0,026	0,016	0,015	0,011	0,018	0,007	0,020	0,006
	Δ Vert	0,025	0,009	0,028	0,034	0,005	0,017	0,025	0,010
	E_d	0,002	-0,030	0,007	-0,004	0,004	-0,002	0,012	-0,016
	Forma	0,040	0,029	0,034	0,028	0,033	0,048	0,036	0,027

Tabella 4-10 - Ripetibilità della sfera tastata con 25 punti in posizione tangenziale e radiale

Test su anello

La norma VDI/VDE 2617-3 prevede la valutazione dell'errore del sistema tastatore su un anello.

Le finalità della prova sono di :

- ✓ constatare l'applicabilità della norma 10360-2 all'anello previsto dalla VDI/VDE 2617-3;
- ✓ decidere la modalità di allineamento dell'anello e la strategia di misura;
- ✓ verificare la qualità e la ripetibilità delle misure in posizioni vicine al limite del raggio d'azione della macchina;
- ✓ applicare la norma UNI EN ISO 10360-4 per il calcolo dell'errore di tastatura in scansione sull'anello;
- ✓ studiare gli effetti comportati dalla velocità di scansione.

Le prove sono state effettuate sull'anello di diametro pari a 45 mm ed errore di forma nullo, in relazione alla risoluzione del braccio di misura, riportato in Figura 4-20.

Tale anello è stato ritenuto il più idoneo allo scopo, perché ha dimensioni contenute, ma sufficientemente ampie per lasciare spazio di manovra al tastatore del braccio (lo stilo è molto corto e tozzo, e faticherebbe a raggiungere i punti interni in un anello più piccolo).

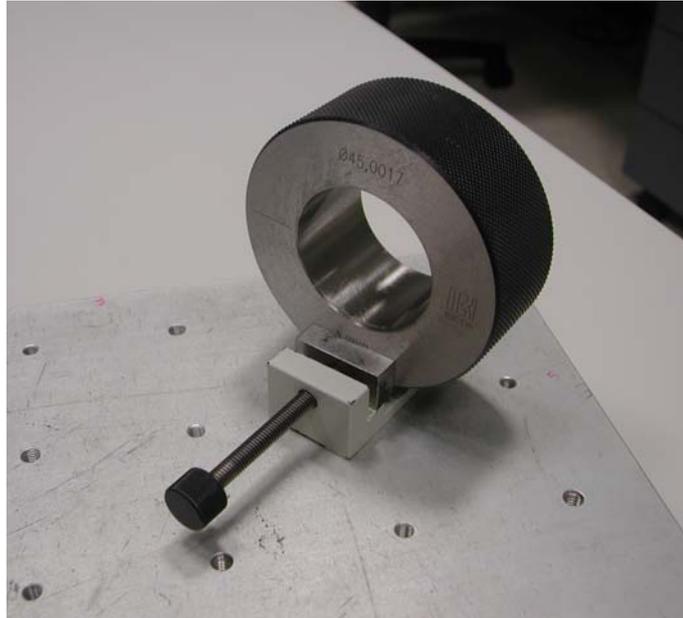


Figura 4-20 - Fissaggio dell'anello

Nell'adattamento della B89 dell'anello si sono rilevati dieci cerchi ciascuno costituito da quattro punti, e da questi si è ricavata l'ampiezza dei centri lungo due assi, in quanto il cerchio è un elemento bidimensionale.

Usando un riferimento solidale al campione, i due errori di ripetibilità vengono nominati ΔX e ΔY e possono avere direzione radiale, tangenziale e verticale rispetto agli assi di riferimento della macchina, a seconda dell'orientazione dell'anello.

Tale operazione va ripetuta per ciascuna orientazione dell'anello, per un totale di sei errori di ripetibilità (ΔX e ΔY Rad, ΔX e ΔY Tang, ΔX e ΔY Vert).

In Tabella 4-11 è riportata la modalità di allineamento e la strategia di misura.

L'anello è stato misurato, con 40 prese punti a mezza altezza, nelle tre posizioni prescritte dalla VDI/VDE 2617-3, ovvero con asse disposto in direzione verticale, radiale e tangenziale. Questa strategia di misura dimostra valori migliori dell'errore di dimensione rispetto al test effettuato sulle sfere e non si notano particolari differenze tra le varie posizioni.

L'allineamento dell'anello viene definito utilizzando come riferimento primario l'asse di un cilindro interno all'anello, composto da 60 punti posti a diverse altezze, e come origine l'intersezione fra tale asse e il piano superiore dell'anello, risultante da quattro punti tastati. Essendo il campione assialsimmetrico non è stato necessario definire un riferimento secondario.

I 60 punti di allineamento o i 40 punti di tastatura vengono tastati tenendo l'asse del tastatore il più parallelo possibile all'asse del cilindro, essendo risultata la soluzione più efficace.

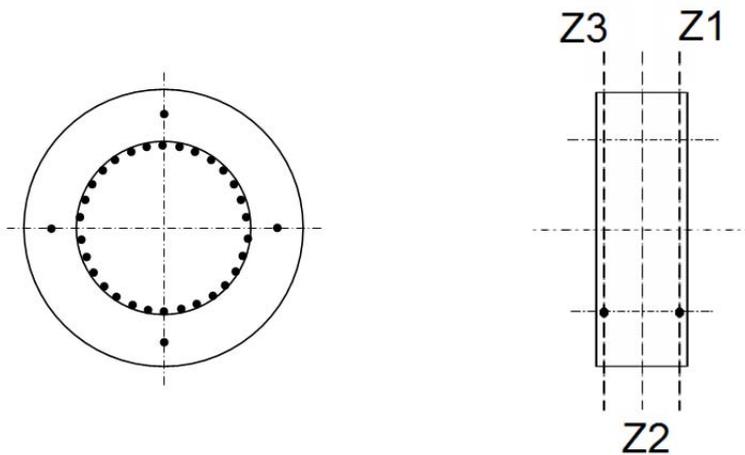


Figura 4-21 - Schema dei punti di tastatura dell'anello

	DIREZIONE	ELEMENTO GEOMETRICO	N. PUNTI	DISTRIBUZIONE PUNTI
ASSE PRIMARIO	X	Asse del cilindro tra Z1 e Z3	60 (30 a Z1, 30 a Z3)	Vedere Figura 4-21 Z1= a 2 mm dal piano superiore dell'anello; Z3= a 2 mm dal piano inferiore dell'anello.
ASSE SECONDARIO	Y	Punto A = intersezione asse cilindro e piano superiore anello Punto B = intersezione retta presa sul cilindro e piano superiore anello; Retta passante per punti A e B	Piano superiore anello: 4 Retta presa sul cilindro: 2 (a Z1 e Z3)	Vedere Figura 4-21 Z2=20 mm
ORIGINE	X	Asse del cilindro	-	-
	Y	Asse del cilindro	-	-
	Z	Piano superiore anello	-	-

Tabella 4-11 - Schema di misura dell'anello

Il posizionamento dell'anello nel volume di lavoro e l'orientazione dello stesso sono indicate rispettivamente in Figura 4-22 e in Figura 4-23

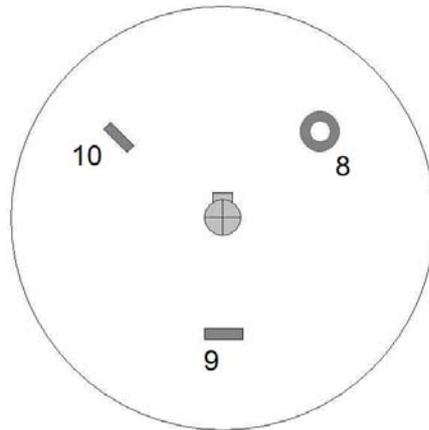


Figura 4-22 - Posizione dei campioni nel volume di misura

<p>8] asse anello verticale Asse dell'anello disposto verticalmente.</p>	<p>9] asse anello radiale Asse dell'anello disposto lungo la direzione radiale.</p>
<p>Una fotografia che mostra un braccio robotico blu e bianco in un laboratorio. In primo piano, un anello metallico è montato su un supporto bianco e si trova in una posizione verticale.</p>	<p>Una fotografia che mostra lo stesso braccio robotico e l'anello metallico, quest'ultimo montato su un supporto bianco e orientato lungo la direzione radiale.</p>
<p>10] asse anello tangenziale Asse dell'anello disposto lungo la direzione tangenziale.</p>	
<p>Una fotografia che mostra il braccio robotico e l'anello metallico montato su un supporto bianco, orientato lungo la direzione tangenziale. Sullo sfondo, è visibile un cartello con la scritta 'PRISM'.</p>	

Figura 4-23 - Posizione dell'anello nelle tre orientazioni

Le prove effettuate sull'anello nelle tre posizioni definite sono riportate in Figura 4-24, Figura 4-25, e Figura 4-26 in cui si vede la dispersione dei dati relativamente al valore del diametro. Tali grafici mostrano i risultati ottenuti applicando la UNI EN ISO 10360-2 all'anello.

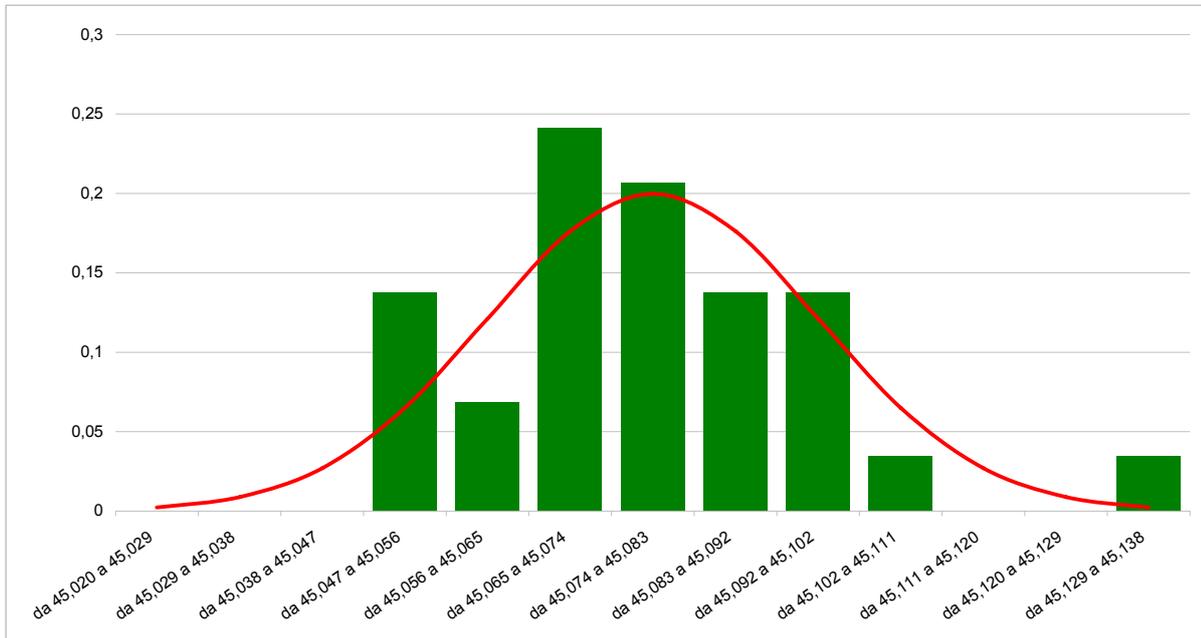


Figura 4-24 - Anello in posizione verticale

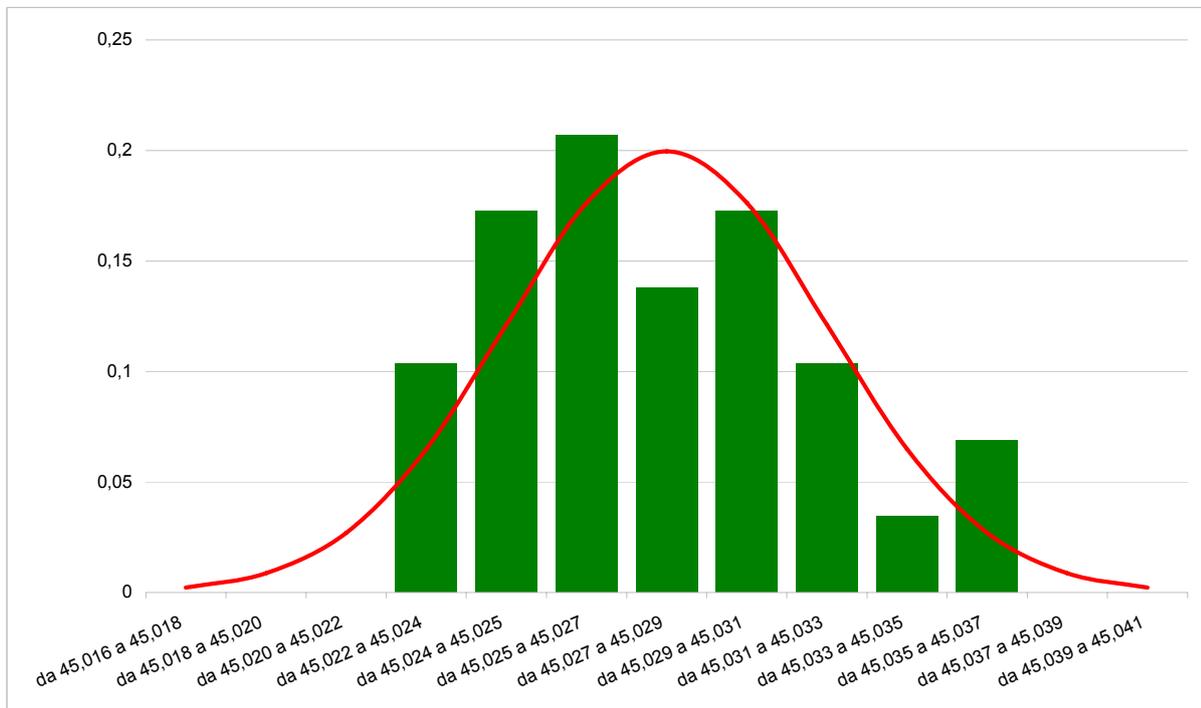


Figura 4-25 - Anello in posizione tangenziale

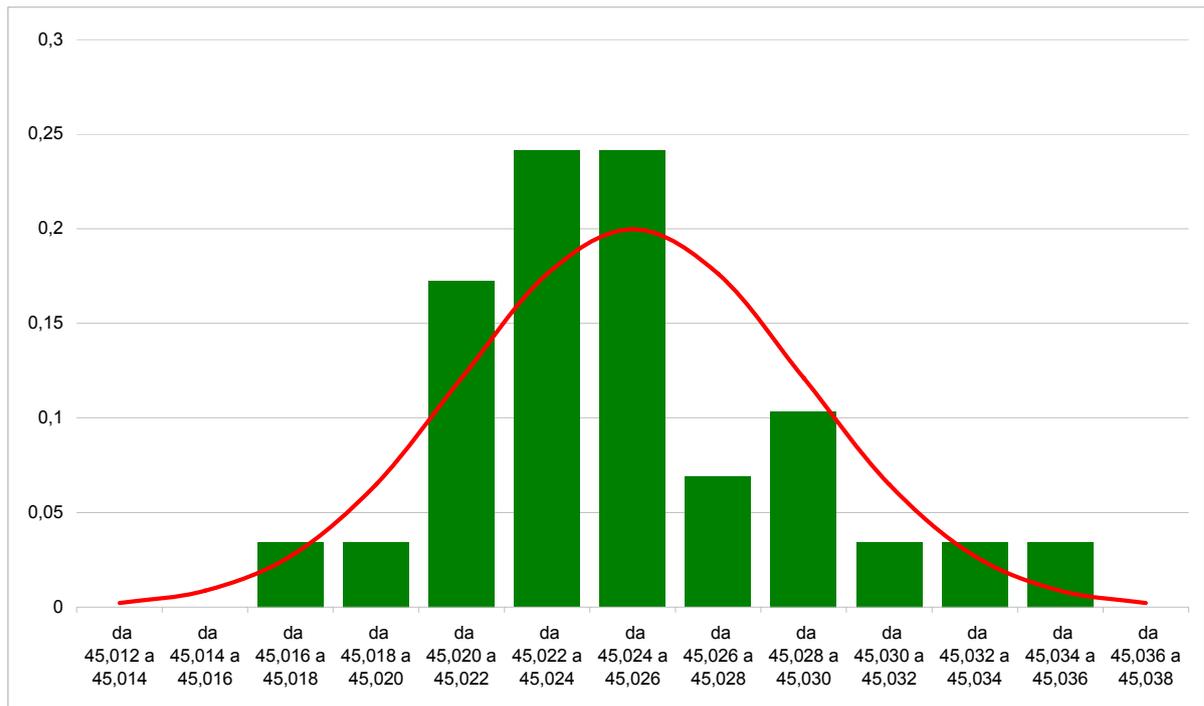


Figura 4-26 - Anello in posizione radiale

Si può concludere che per le misure di forma e posizione, finalizzate al calcolo degli errori di tastatura (P), ripetibilità (ΔX e ΔY) e tastatura in scansione (T), si propone l'utilizzo di un anello di 45 mm di diametro, tarato per forma, da misurare in tre posizioni definite come Verticale, Tangenziale e radiale.

La scelta di questo campione rispetto ad una sfera è data dalla possibilità di indagare un eventuale errore che lo strumento può manifestare, a causa di un malfunzionamento, lungo uno degli assi in questione. Si è potuto vedere che errori evidenti in una specifica posizione dell'anello sono riconducibili ad un possibile malfunzionamento di relativi giunti.

È stata valutata ora la possibile applicazione all'anello della UNI EN ISO 10360-4, per il calcolo dell'errore di tastatura in scansione e l'errore dimensionale in scansione. Sull'anello sono stati percorsi due giri completi a mezza altezza in scansione e si è valutato l'errore sul diametro.

Essendo il braccio uno strumento manuale non è possibile impostare una velocità di scansione e non è altrettanto possibile avere una velocità di scansione costante.

Come E_d in tastatura, E_d' è confrontabile con MPE_E , ma nella taratura proposta non viene utilizzato come parametro di verifica. In questo paragrafo è stato riportato solo a scopo conoscitivo, poiché è confrontabile con l'errore che si ha nella misura puntuale.

Si nota come gli errori di tastatura e dimensione siano tendenzialmente più bassi in scansione, e vadano riducendosi all'aumentare della velocità.

Le prove di tastatura e scansione evidenziano l'influenza di fattori esterni, quali la manualità dell'operatore e la stabilità del sistema, che sono fonti elevate di errore.

Al termine della campagna di prove per valutare l'errore di forma si può arrivare alle seguenti conclusioni:

- ✓ la norma UNI EN ISO 10360-2 per il calcolo dell'errore di tastatura P è applicabile sia alle sfere che all'anello
- ✓ il campione scelto per la procedura di verifica delle prestazioni del braccio è l'anello perché permette di indagare maggiormente eventuali errori causati da malfunzionamento degli encoder dei giunti.
- ✓ l'anello viene disposto lungo le tre direzioni degli assi coordinati del sistema di riferimento della macchina, radiale, tangenziale e verticale (secondo VDI/VDE 2617-3);
- ✓ al parametro P si può affiancare un altro parametro paragonabile a E, sulla misura del diametro;
- ✓ sono stati rilevati dieci cerchi per ricavare l'ampiezza dei centri di regressione e i conseguenti errori di ripetibilità in tastatura e in scansione (ΔX e ΔY);
- ✓ la norma UNI EN ISO 10360-4 viene adattata e applicata all'anello, ricordando che lo strumento di misura è manuale

Queste prove di misura sono molto significative perché con esse si è cercato di adattare le prove di tastatura e ripetibilità, ricavando un'unica procedura adatta a soddisfare al meglio tutte le esigenze delle norme UNI EN ISO 10360-2, UNI EN ISO 10360-4, VDI/VDE 2617-3 e ASME B89.4.22.

In conclusione, il test ha dimostrato che la norma ASME B89 per il calcolo dell'errore di ripetibilità è teoricamente applicabile sia alle sfere che all'anello. Tuttavia le misure sulle sfere sono affette da un elevato errore, perché nove punti non garantiscono la corretta costruzione di una sfera.

La norma ASME B89 è adattabile anche alla scansione, per il calcolo dell'errore di ripetibilità in scansione, ma risulta laboriosa per via delle dieci scansioni da effettuare. L'errore citato non è menzionato in nessuna norma, perciò non è richiesto di inserirlo nella procedura di taratura.

I risultati relativi agli errori di tastatura e di posizione vengono riassunti e presentati in una tabella come la Tabella 4-12 e graficamente in Figura 4-27, Figura 4-28 e Figura 4-29.

I valori ottenuti in questa misura sono buoni poiché i risultati delle tre posizioni dell'anello hanno lo stesso andamento. P e T si confermano maggiori di ΔX e ΔY , ma in nessun caso l'MPE_P è superato. Gli errori dimensionali sono sempre molto contenuti

Errore [mm]	Rif. Norma	Asse X*	Asse Y*	Asse Z*
Errore sulle coordinate dei centri dei cerchi lungo asse X	ASME B 89	0,013	0,012	0,018
Errore sulle coordinate dei centri dei cerchi lungo asse Y	ASME B 89	0,019	0,021	0,022
Errore di tastatura P	VDI/VDE 2617 ISO 10360	0,026	0,019	0,025
Errore di tastatura in scansione T _{ij}	VDI/VDE 2617 ISO 10360	0,017	0,015	0,019

Tabella 4-12 - Errori di tastatura e di posizione

* Direzione di allineamento dell'asse di simmetria dell'anello.

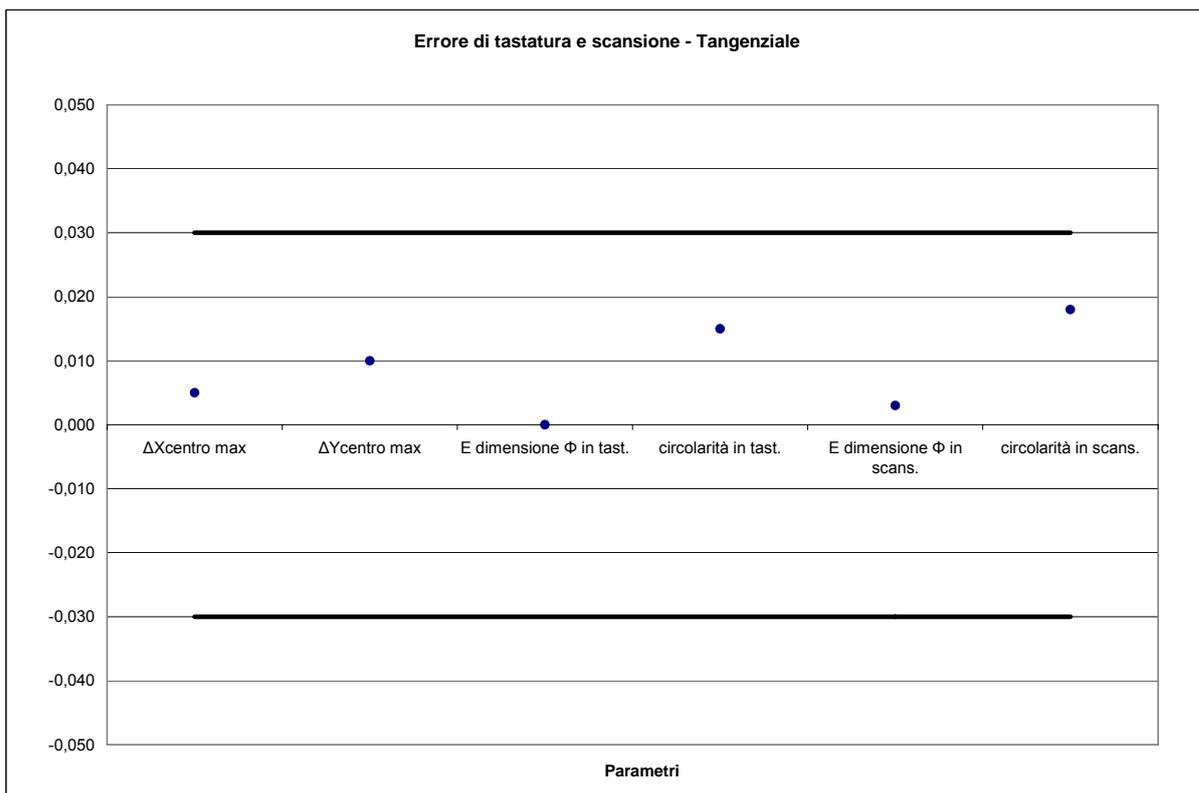


Figura 4-27 - Errore di tastatura in direzione tangenziale

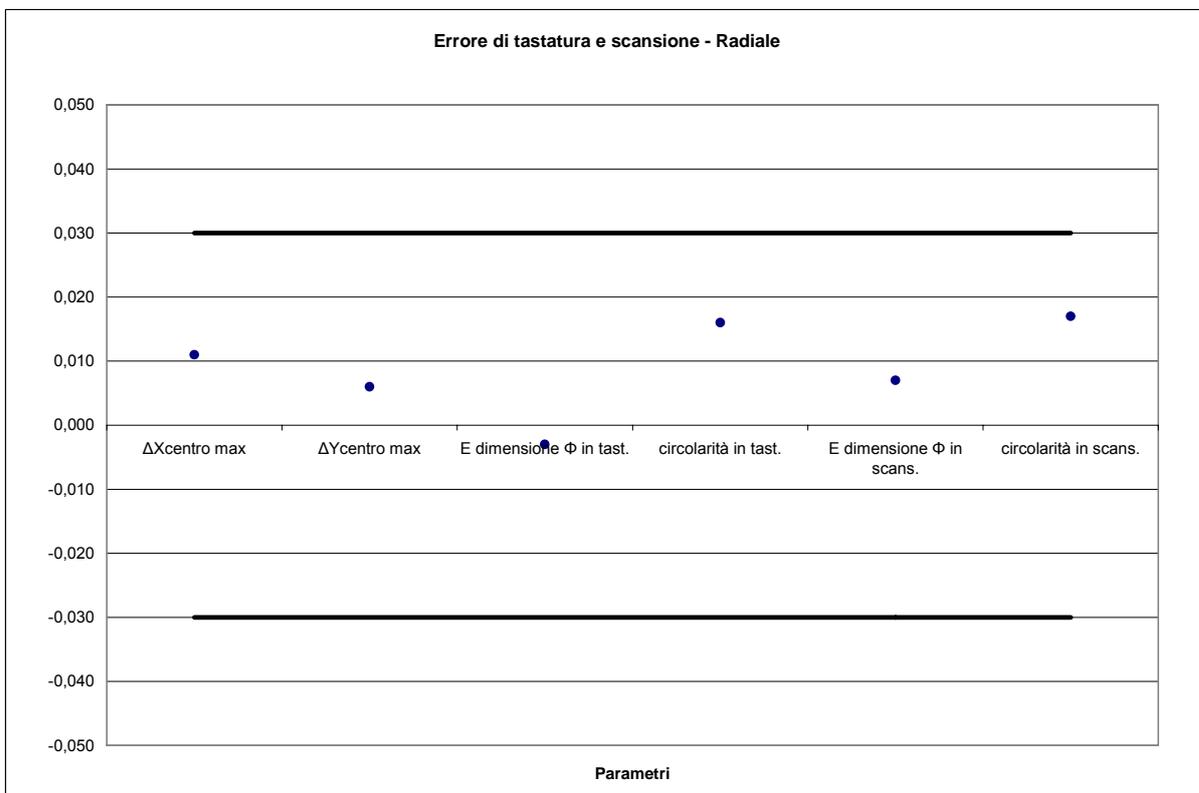


Figura 4-28 - Errore di tastatura in direzione radiale

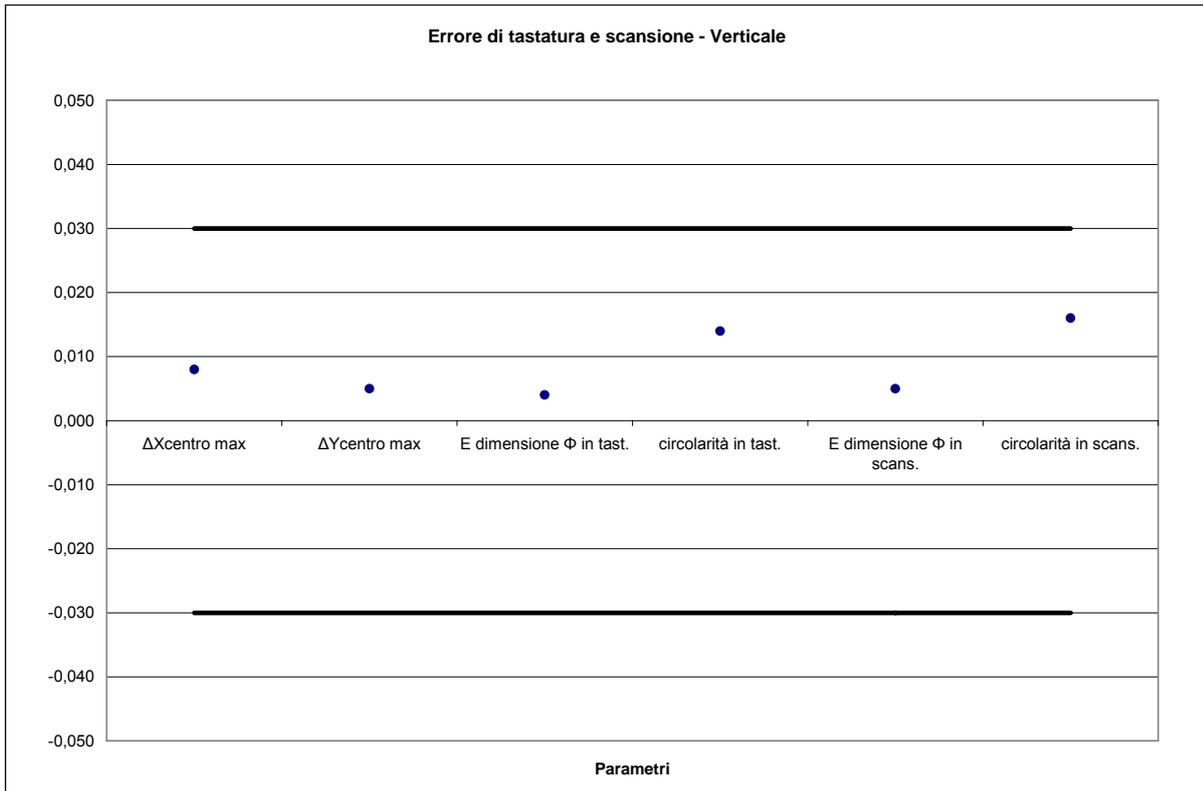


Figura 4-29 - Errore di tastatura in direzione verticale

4.4.2 Sonda non a contatto

4.4.2.1 Ball bar rilevate con il laser

È opportuno fare una considerazione a proposito delle ball bar che si usano per la taratura. Esistono infatti dei problemi di riflessione del fascio laser dovuti dall'angolo formato tra il laser e la normale alla superficie dell'oggetto scansionato. Nel caso specifico della rilevazione di superfici sferiche si riscontra l'incapacità di acquisire dati attendibili nella zona della calotta sferica prossima al diametro massimo, con l'inconveniente di ottenere un diametro più grande di quello di riferimento.

Questa differenza è trascurabile se il fascio laser segue la curvatura, e questa modalità di scansione è facilitata dal settimo grado di libertà del braccio.

Pertanto nella fase di valutazione delle prestazioni del solo laser si è preferito non utilizzare le sfere come campione di riferimento, poiché la loro misurazione è molto vincolata all'articolazione del braccio.

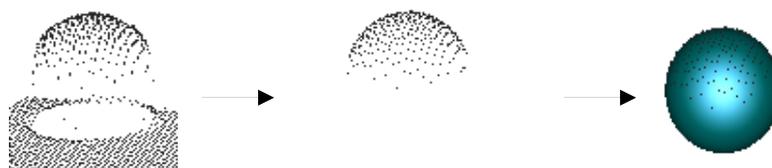


Figura 4-30 - Procedura per ricreare le sfere.

4.4.2.2 Errore di planarità

Tra i parametri caratteristici di uno strumento ottico la norma VDI/VDE 2634 Parte 2 prevede la valutazione della planarità di un componente a forma di parallelepipedo, il cui errore di forma è tarato e di almeno un quinto rispetto alle specifiche dello strumento.

È stata valutata la planarità di un piano bianco opaco, cioè una superficie perfettamente liscia e otticamente cooperante, misurato nelle tre diverse messe a fuoco del sistema. Infatti il sistema laser può operare in differenti intervalli all'interno del range di profondità di campo.

Infatti l'intervallo operativo di funzionamento della sonda laser prevede tre configurazioni durante l'acquisizione, che sono definite da due led luminosi che indicano la distanza tra la sonda e l'oggetto:

1. Intervallo centrale o FOCUS (due LED verdi). La sonda laser si trova al centro dell'intervallo.
2. Intervallo prossimale o NEAR (solo il primo LED è verde). La sonda laser rientra nell'intervallo, nella zona più vicina al componente che sta acquisendo.
3. Intervallo distale o FAR (solo il secondo LED è verde). La sonda laser rientra nell'intervallo, nella zona più lontana del componente.

Per completezza, se entrambi i LED sono rossi significa che la sonda laser è troppo vicina o troppo lontana rispetto alla superficie da scansionare.

Si è effettuata una serie di scansioni con la sonda nei tre intervalli per valutare sia la ripetibilità della sonda, sia il valore di planarità R_E .

Questa modalità di acquisizione ha permesso anche una valutazione della variabilità dell'intervallo di funzionamento e dei parametri metrologici dello strumento e un confronto tra i diversi intervalli di funzionamento.

I valori della planarità di ciascuna acquisizione sono riportati in Figura 4-31.

Per determinare l'andamento del piano di riferimento viene costruito un piano di best fitting che rappresenta la migliore approssimazione col metodo dei minimi quadrati.

Il risultato della sperimentazione consiste nella redazione di una tabella che sintetizzi i parametri caratteristici in funzione della distanza dall'oggetto e del campo di presa.

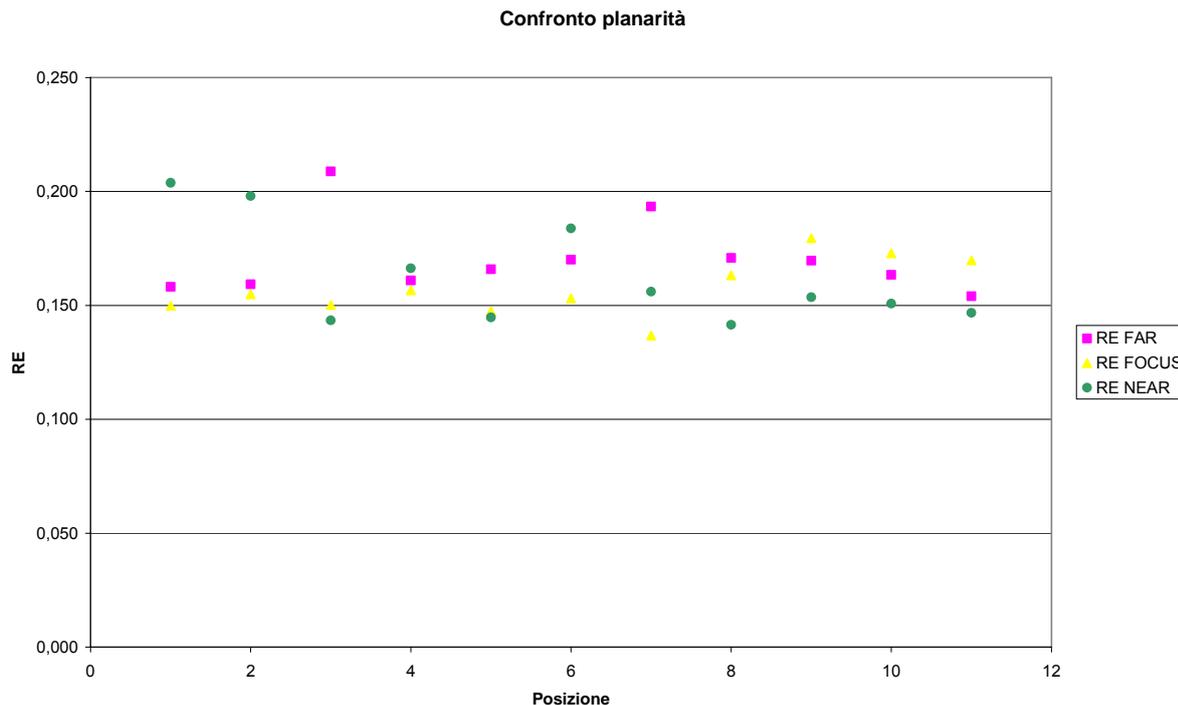


Figura 4-31 - Valore di planarità ottenuto con la sonda laser

In

Tabella 4-13 vengono riportati per ciascun intervallo di acquisizione i valori medi della planarità, della deviazione standard e dei punti di acquisizione del piano.

	Punti di acquisizione	Planarità	deviazione standard
FAR	428834	0,170	0,017
FOCUS	304728	0,158	0,016
NEAR	501032	0,163	0,015

Tabella 4-13 - Valori relativi al piano acquisito

4.4.2.3 Artefatti per il laser

Come già anticipato nel Capitolo 2, per quanto riguarda i parametri caratteristici del laser la norma non prevede la valutazione della precisione e della risoluzione lungo l'asse z dello strumento.

Alla luce di quanto esposto e valutata la difficoltà di rilevare le sfere con il laser per la valutazione dell'errore di forma, si propone l'utilizzo di due artefatti creati ad hoc per la valutazione dei parametri caratteristici dello strumento.

La procedura di prova consiste nell'acquisizione dei due artefatti da parte del sistema laser. Per ciascuna acquisizione effettuata si ottiene una nuvola di punti rappresentativa dell'artefatto. Tutte le nuvole vengono analizzate dal software che consente di generare la

superficie di best fit dell'artefatto. Successivamente vengono calcolate, rispetto alle superfici di best fit, sia la deviazione standard che lo scostamento massimo di ogni nuvola di punti.

La precisione di digitalizzazione ricavata risulta essere proporzionale agli scostamenti di ogni nuvola di punti rappresentante un pezzo acquisito dalla propria superficie di best fit. Tali scostamenti, infatti, rappresentano le distanze dalla superficie di best fit dei punti componenti la nuvola e sono misurati perpendicolarmente alla medesima superficie.

Con questi campioni si vuole valutare le prestazioni del laser rendendo la procedura e l'utilizzo dello strumento ottico il più possibile indipendente dall'articolazione del braccio. Le dimensioni non elevate di tali campioni sono state scelte proprio per le considerazioni finora espresse: limitare il movimento del braccio per valutare la precisione e l'accuratezza del solo laser.

Si possono considerare come indicatori della precisione di un sistema laser i seguenti parametri:

- la media degli scostamenti dei punti di ogni nuvola dalla rispettiva superficie di best fit;
- la deviazione standard relativa alla media stessa;
- il valore massimo raggiunto dagli scostamenti.

4.4.2.3.1 Artefatto 1

Il provino a forma di parallelepipedo previsto dalla Norma VDI/VDE 2634 Part 2 serve solo per determinare il parametro di qualità R_E che definisce la precisione di digitalizzazione del sistema in esame nelle misure di planarità.

Per ottenere una migliore descrizione delle prestazioni del sistema è stato adottato un nuovo artefatto ottenuto con la combinazione di 5 blocchetti piano paralleli i quali realizzano un certo numero di alzate.

Tale provino è illustrato in Figura 4-32 e in seguito sarà chiamato Artefatto 1.

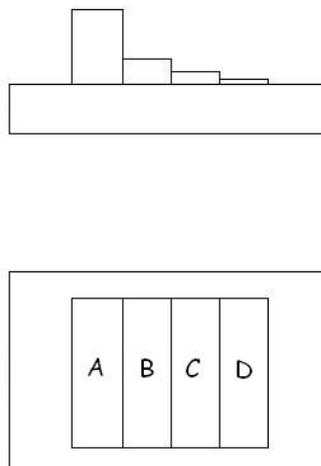


Figura 4-32 - Modello dell'Artefatto 1

L'artefatto è stato progettato tenendo in considerazione le caratteristiche tecniche e costruttive del laser, in particolare il campo di risoluzione in direzione Z dello strumento. Infatti con tale provino si può valutare il parametro R_E richiesto dalla norma e altre due grandezze che danno una stima della precisione dello strumento ottico. Tali grandezze sono la risoluzione in z e la precisione in z del sistema. L'asse Z a cui fanno riferimento è l'asse del digitalizzatore.

Si definisce come risoluzione in Z di un digitalizzatore la minima distanza tra due punti che lo strumento è in grado di misurare. In realtà tale definizione va modificata poiché dal punto di vista fisico non ha senso parlare di distanza tra punti, essendo un punto un'entità astratta. Pertanto la definizione di risoluzione in Z va corretta definendola come minima distanza tra due superfici che il digitalizzatore riesce a misurare, parallelamente al suo asse Z.

Questa definizione è fisicamente più plausibile in quanto la distanza tra due superfici è un'entità misurabile e in parte giustifica la scelta della geometria dell'artefatto, poiché l'alzata di un gradino si può ritenere come la misura della distanza tra due superfici.

La precisione in Z del sistema è la variazione subita dalle misure, realizzate dal sistema, al variare della posizione in Z dell'oggetto misurato. Vanno, tuttavia, considerate solo quelle variazioni della posizione in Z dell'oggetto che gli consentono comunque di restare all'interno del volume di misura del sistema.

L'Artefatto 1 presenta quattro blocchetti piano paralleli affiancati e posizionati su una superficie liscia, che riproducono quattro gradini con alzate di ampiezze differenti.

Le dimensioni dei blocchetti utilizzati sono state ricavate dal certificato di taratura dei blocchetti e riportate in Tabella 5-4 presente in Appendice 1.

Il materiale di cui sono costituiti è l'acciaio, anche se per lo scopo sarebbe più auspicabile un materiale ceramico, caratterizzato da una bassa riflettività che facilita la digitalizzazione garantendo una qualità elevata alle acquisizioni. Essendo questo provino solo un prototipo non è stato realizzato l'analogo in ceramica.

I parametri di risoluzione e precisione permettono di caratterizzare in maniera più adeguata la precisione del sistema di misura, relativamente alla ricostruzione tridimensionale di una singola acquisizione.

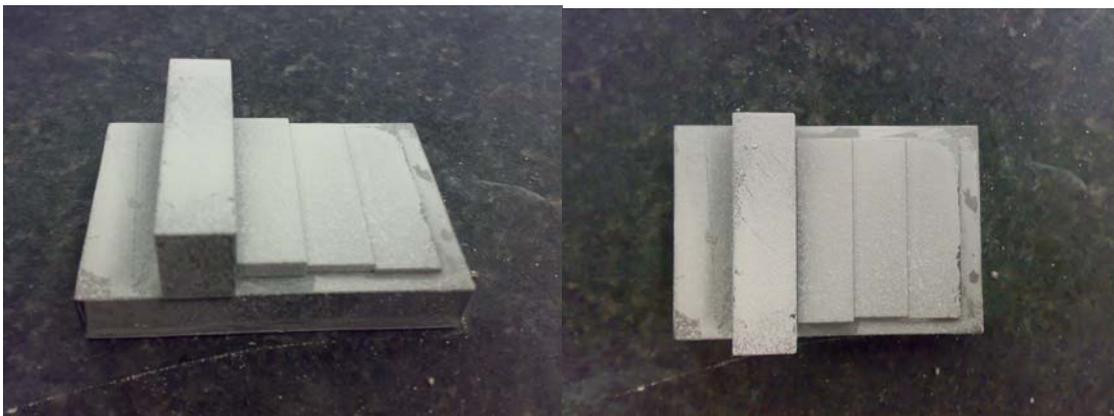


Figura 4-33 - Artefatto 1

Rilievi sperimentali condotti sull'Artefatto 1.

L'artefatto è stato disposto in più posizioni del volume di lavoro del braccio e raggiunto, in ciascuna posizione dallo strumento laser, grazie all'articolazione del braccio. Nella fase di

misura si è cercato di rendere minima l'influenza dell'articolazione del braccio di misura per valutare la precisione dello strumento ottico. Per tale motivo si sono cercate di evitare le posizioni limite del braccio.

L'acquisizione del provino è avvenuta mantenendo il laser sempre ortogonale alle facce dei blocchetti piano paralleli, ossia il digitalizzatore li riprendeva in pianta, cioè con l'asse Z disposto sempre ortogonale alle superfici da rilevare.

Per ciascuna posizione sono state realizzate tre acquisizioni dell'artefatto, in maniera tale da avere una base dati sufficiente ampia per caratterizzare ogni singola posizione e per valutare se le misure in tali posizioni siano indipendenti dalla movimentazione del braccio.

Innanzitutto si è constatato che le nuvole di punti acquisite con i provini lucidi sono costituite da un numero molto esiguo di punti poiché le acquisizioni sono contraddistinte da ampi riflessi, essendo il campione in acciaio.

Pertanto, per ridurre la riflessività intrinseca del provino si è utilizzato uno spray opacizzante che apporta uno strato superficiale micrometrico senza modificare le caratteristiche superficiali del componente.

Ciascuna acquisizione corrisponde ad una nuvola di punti che viene elaborata con il software Power Inspect. Un esempio di tali nuvole è riportata in Figura 4-34.

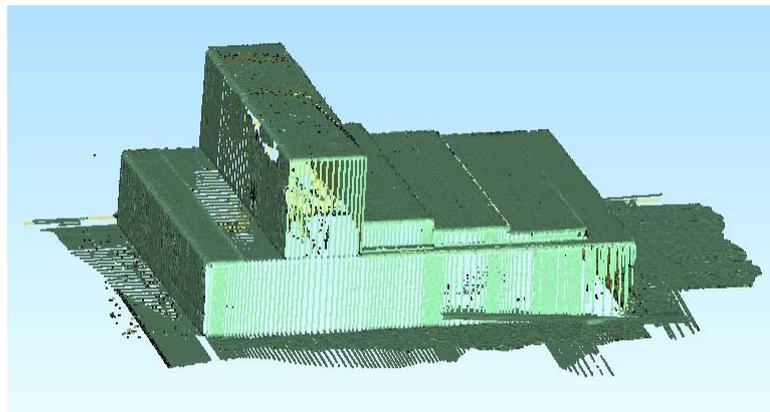


Figura 4-34 - Nuvola di punti dell'Artefatto 1

I punti di ciascuna area sono stati impiegati per la costruzione di un piano di best fit per poi valutare il valore di planarità di ciascun piano costruito e calcolare la distanza media tra le superfici dal piano di riferimento, che è il piano medio su cui i blocchetti poggiano.

Il sistema di riferimento è stato costruito utilizzando i 3 piani (Piano 1, Piano 2 e Piano 3) indicati in Figura 4-35. Il Piano 1 risulta l'asse primario, mentre il piano 2 è la fasatura. L'origine è stata creata nel punto di intersezione dei tre piani.

La procedura grafica riportata in Figura 4-35.

L'artefatto è stato posizionato in più zone del volume di lavoro del braccio, valutando sia la ripetibilità che la riproducibilità del laser, ma principalmente si possono individuare due macro zone: la prima è quella vicina alla base del braccio, la seconda più lontana.

Il campione è stato scansionato cercando di rendere minimi i movimenti dei giunti del braccio, e questo è stato possibile poiché una configurazione a gradini di questo tipo permette di rilevare la superficie facendo rimanere la lama laser sempre ortogonale alle facce dei blocchetti e limitando la movimentazione del braccio, in quanto la messa a fuoco resta costante per tutto il campione e permette, in un'unica passata, l'acquisizione delle superfici.

L'influenza dell'articolazione del braccio si nota confrontando gli errori delle distanze, tra la posizione vicina e quella lontana, presentati nei grafici di Figura 4-36 e Figura 4-37.

Si nota che pur rimanendo all'interno dell'errore massimo dichiarato dal costruttore, le deviazioni relative alla posizione più lontana sono maggiori rispetto ai dati ricavati in posizione vicina. Questo è da attribuire all'influenza dell'articolazione del braccio, in quanto più ci si allontana dalla base dello strumento, maggiore è il contributo dovuto ad errori di posizione o angolari.

Sono state calcolate le distanze dei piani dal piano di riferimento 1 e i valori medi per ciascuna posizione riportati in Figura 4-36 e Figura 4-37.

I valori della planarità non sono stati riportati in quanto la polvere antiriflesso non permetteva di confrontare coerentemente i valori ricavati con quelli di riferimento, che erano dell'ordine del micron.

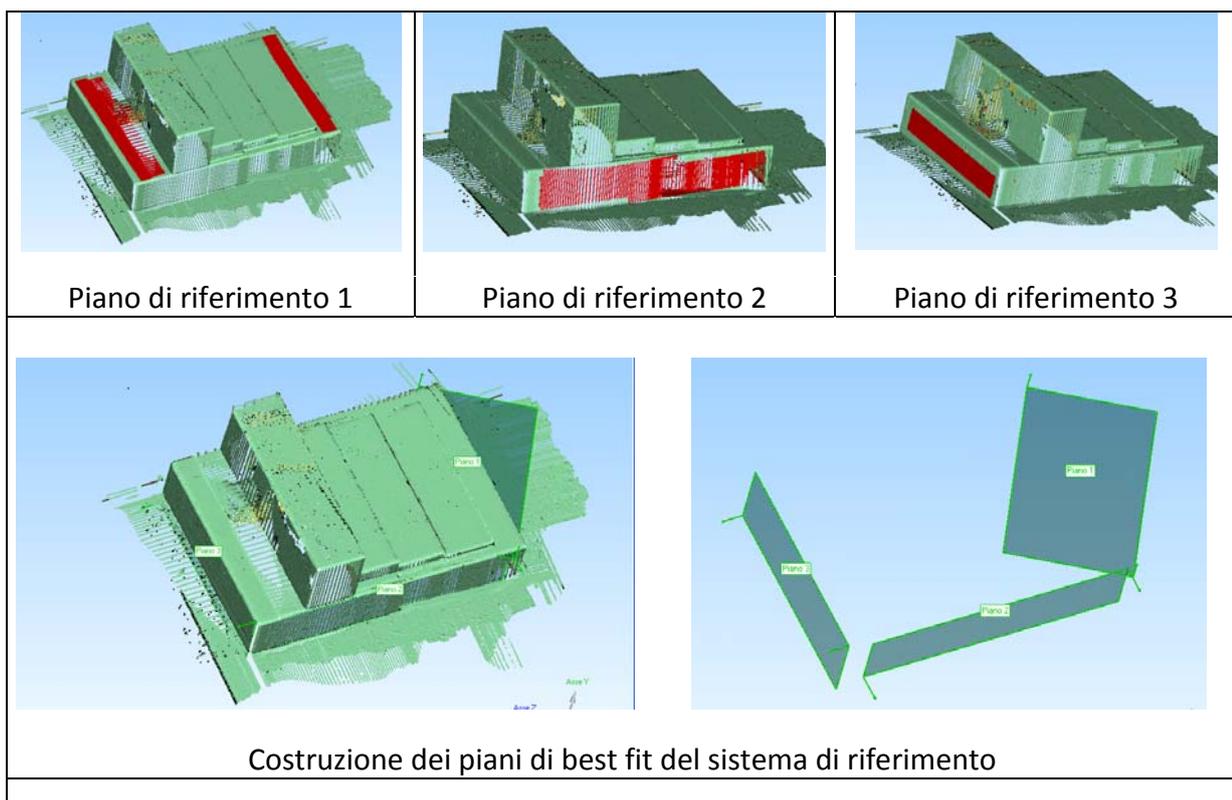




Figura 4-35 - Fasi di costruzione dei piani di best fit a partire dalla nuvola di punti acquisiti con la sonda laser

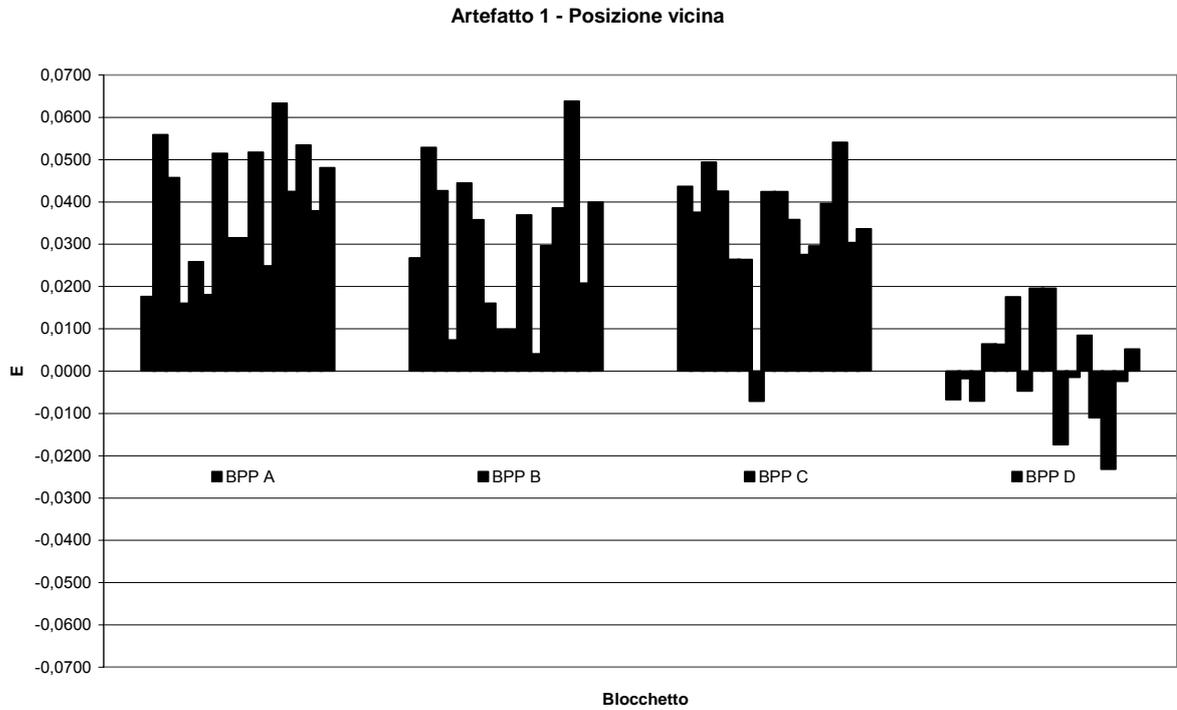


Figura 4-36 - Istogramma relativo all'Artefatto 1 in posizione vicina

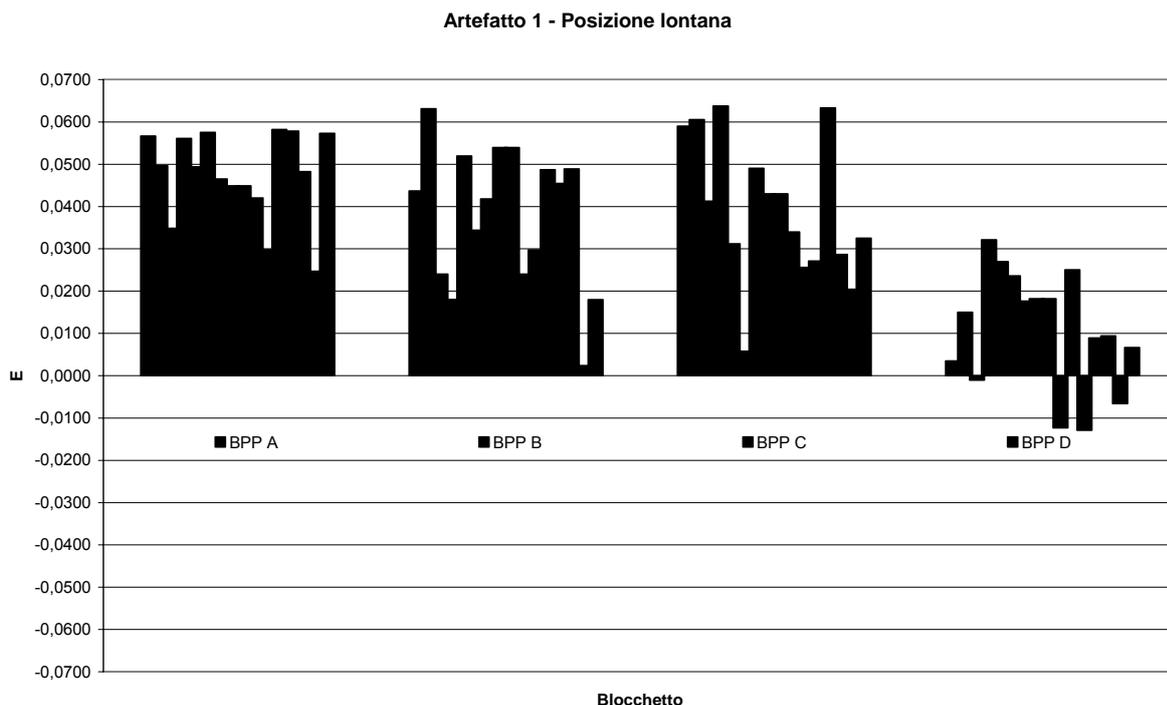


Figura 4-37 - Istogramma relativo all'Artefatto 1 in posizione vicina

Il massimo scostamento dal valore nominale, riportato in Tabella 4-14, è il massimo errore rilevato se tutte le deviazioni sono positive, mentre ottenuto come differenza tra valore massimo e minimo rilevati, nel caso le deviazioni siano di segno diverso.

Posizione	Parametro	A	B	C	D
vicina	Deviazione standard	0,016	0,017	0,014	0,012
	Massimo scostamento	0,063	0,064	0,061	0,043
lontana	Deviazione standard	0,011	0,017	0,017	0,014
	Massimo scostamento	0,058	0,063	0,064	0,045

Tabella 4-14 - Parametri riassuntivi

I valori delle alzate rispetto al piano medio sono omogenei e non dipendono dalla posizione in cui si trova l'artefatto rispetto alla base del braccio. Questo porta a concludere che la movimentazione non ha influito particolarmente nella misurazione con il laser e ha, perciò, permesso di valutare le caratteristiche di precisione dello strumento ottico.

4.4.2.3.2 Artefatto 2

Il campione è stato acquisito mediante la sonda laser in tre posizioni e orientazioni differenti del volume di lavoro.

La nuvola di punti ricavata è stata elaborata con il software Power Inspect con questa procedura e con riferimento alla Figura 4-38:

- è stato ricavato il Piano 1 di best fit che funge da riferimento primario e da origine dell'asse Z;
- è stato ricavato il Piano 2 di best fit e utilizzato come fasatura;
- è stato ricavato il Cilindro esterno da utilizzare come origine dell'asse X e dell'asse Y;
- sono state calcolate le nove sfere di best fit, seguendo la numerazione in Figura 4-38, e ricavate le caratteristiche geometriche.

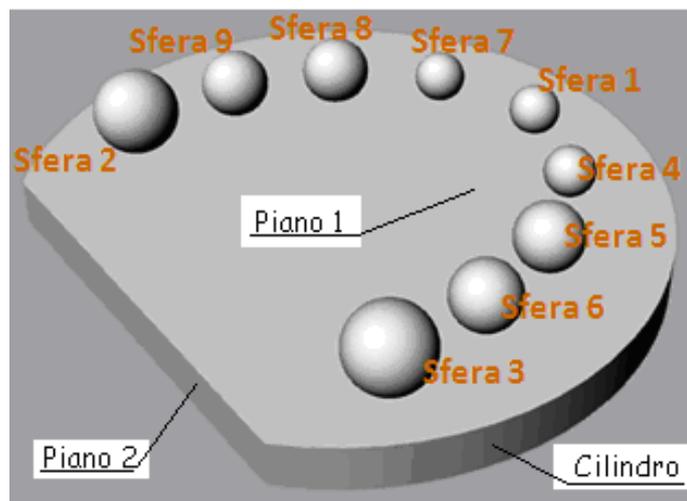


Figura 4-38 - Riferimenti Artefatto 2

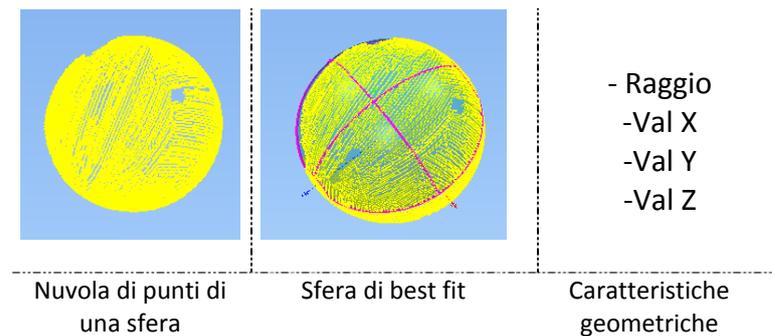


Figura 4-39 - Fasi di elaborazione della sfera

L'analisi dei dati provenienti dalle scansioni dell'Artefatto 2 ha permesso di determinare il valore medio del diametro e delle coordinate X, Y e Z della posizione del centro di ciascuna sfera.

Tali valori sono successivamente confrontati con quelli di riferimento, che sono riportati in Appendice 1 e calcolato l'errore medio di dimensione SD per ciascuna posizione.

I valori medi del raggio e delle singole coordinate sono riportati nella Tabella 4-15. Tutti i valori sono espressi in millimetri.

Sfera	Posizione 1				Posizione 2				Posizione 3			
	Raggio	Val X	Val Y	Val Z	Raggio	Val X	Val Y	Val Z	Raggio	Val X	Val Y	Val Z
Sfera 1	2,999	-0,208	21,956	2,097	2,971	-0,210	21,976	2,127	2,929	-0,208	22,002	2,171
Sfera 2	4,993	-24,809	-17,886	4,486	4,958	-24,851	-17,880	4,524	4,984	-24,807	-17,850	4,465
Sfera 3	4,989	24,519	-18,252	4,488	4,985	24,524	-18,226	4,498	4,967	24,531	-18,259	4,522
Sfera 4	3,001	11,234	17,466	2,075	2,986	11,218	17,459	2,102	2,938	11,256	17,517	2,139
Sfera 5	3,997	19,321	7,258	3,335	3,971	19,309	7,250	3,366	3,963	19,329	7,284	3,365
Sfera 6	3,991	23,687	-4,838	3,366	3,992	23,682	-4,826	3,363	3,971	23,677	-4,824	3,373
Sfera 7	3,000	-11,722	17,281	1,991	2,985	11,732	17,274	2,003	2,941	-11,707	17,334	2,039
Sfera 8	3,996	-19,354	7,350	3,367	3,968	19,374	7,347	3,396	3,977	-19,332	7,384	3,375
Sfera 9	3,994	-23,491	-4,851	3,365	3,976	23,513	-4,843	3,378	3,990	-23,469	-4,814	3,347

Tabella 4-15 - Valori del raggio e delle coordinate del centro delle sfere

Si riportano di seguito i grafici relativi alla valutazione degli errori dello strumento quando l'Artefatto si trovava in posizione 1. (Figura 4-40, Figura 4-41, Figura 4-42, Figura 4-43)
 Per completezza i grafici relativi alle posizioni 2 e 3 sono riportati in Appendice 4. [Figura 5-7, Figura 5-8, Figura 5-9, Figura 5-10, Figura 5-11, Figura 5-12, Figura 5-13, Figura 5-14]

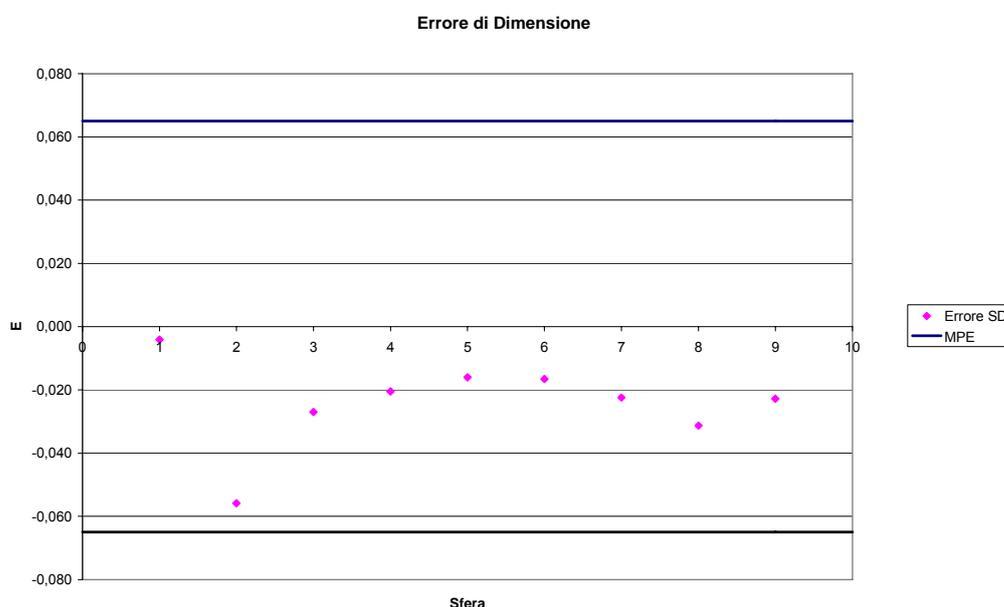


Figura 4-40 - Errore di dimensione delle sfere in Posizione 1

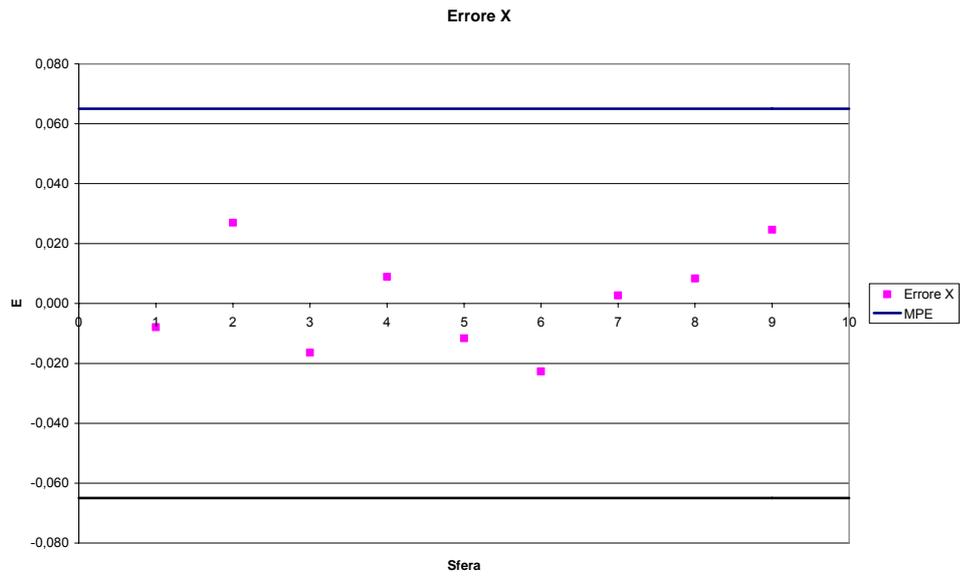


Figura 4-41 - Errore di posizione in Z delle sfere in Posizione 1

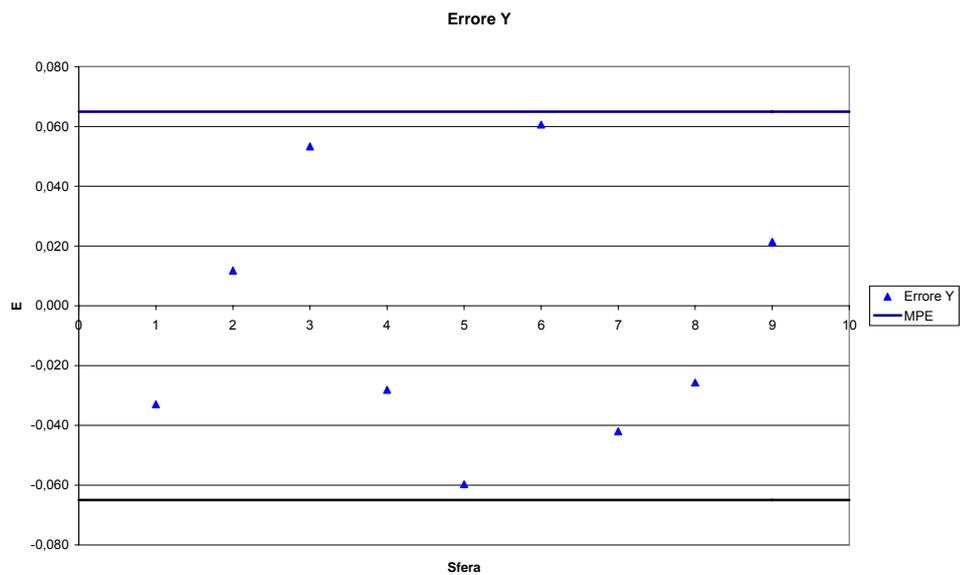


Figura 4-42 - Errore di posizione in Y delle sfere in Posizione 1

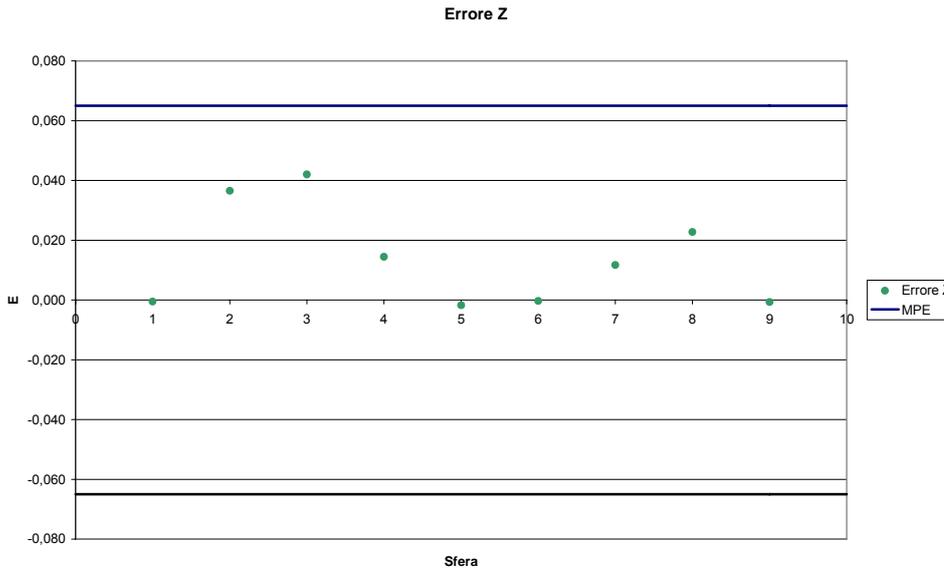


Figura 4-43 - Errore di posizione in Z delle sfere in Posizione 1

Sono infine state calcolate le distanze tra i centri di tutte le sfere rispetto alla sfera 2 e alla Sfera 3. I valori medi di tutti i valori ottenuti nelle tre posizioni dell'Artefatto sono riportati in

Distanze tra centri	Sfera 2 [mm]	Sfera 3 [mm]
Sfera 1	46,886	47,263
Sfera 2	-	49,329
Sfera 3	49,329	-
Sfera 4	50,543	38,184
Sfera 5	50,803	26,059
Sfera 6	50,233	13,486
Sfera 7	37,606	50,816
Sfera 8	25,842	50,809
Sfera 9	13,149	49,858

Tabella 4-16 - Valori delle distanze tra sfere

Se queste distanze si confrontano con quelle di riferimento, riportate in Appendice 1, si nota che l'errore di dimensione E è dell'ordine di qualche decimo di micron, e ciò dimostra l'accuratezza e la precisione dello strumento in esame.

Al termine dell'indagine il campione si dimostra adeguato alle finalità della prova sviluppata, in quanto permette di valutare l'accuratezza dello strumento di misura ricavando i parametri di errore previsti dalla norma tedesca VDI/VDE 2634 Part 2.

4.5 Confronto tra sonda a contatto e sonda non a contatto

A questo punto, dopo aver valutato le prestazioni del sistema meccanico e del sistema di acquisizione ottico separatamente, la norma internazionale ISO 10360-7 prevede vengano confrontate le misurazioni dei due sistemi.

Il metodo adottato per confrontare le prestazioni del braccio articolato e della sonda a scansione è basato sui campioni consigliati dalle normative già ampiamente discusse.

Questo metodo, di tipo comparativo, è basato sul rilevamento di artefatti, nel caso particolare di ball bar calibrate, d parte di entrambi i sistemi.

E' importante che la posizione degli oggetti, il metodo di rilevamento e le temperatura siano le stesse in modo tale da assicurare la validità del metodo. Anche le condizioni in cui avvengono i rilevamenti hanno influenza sul risultato finale, quindi le condizioni ambientali devono essere uguali per entrambe le acquisizioni. Il principio su cui si basa questo metodo è l'alternanza delle acquisizioni tra la sonda a contatto e quella non a contatto. Il ciclo di misurazioni è riportato nella Figura 4-44.

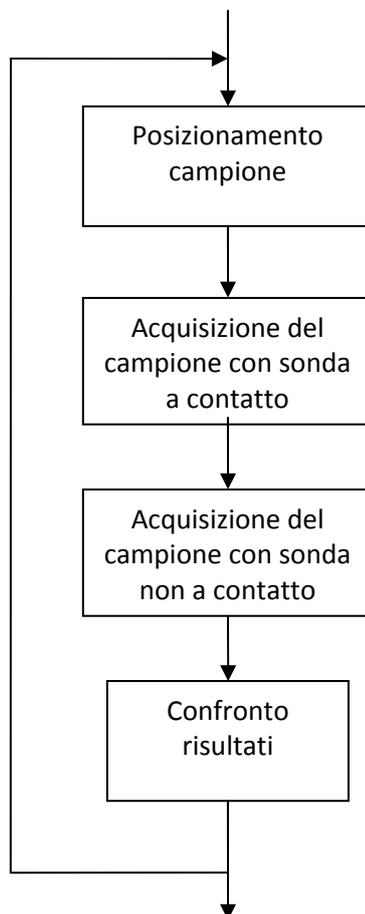


Figura 4-44 - Definizione del ciclo di acquisizioni.

Dal confronto si ottiene un valore che indica la similitudine tra le diverse tipologie di sensore.

La scelta delle due ball bar per questa prova deriva dai risultati delle prove effettuate sulle sfere nel § 4.3.1

Infatti sono le ball bar in cui si ha la minor dispersione e la maggior accuratezza.

In relazione anche ai risultati sperimentali ottenuti nelle prove precedenti, si è adottata la strategia di misura riportata in Tabella 4-17:

	Braccio	Laser
Campione	2 Ball bar	
Strategia di misura	Sfere misurate per 25 punti	Sfera in scansione
Parametri di misura	1 solo orientamento del tastatore	rimanendo il più possibile ortogonale alla superficie
Posizioni del campione	A 1/2 del Raggio del braccio	
Numero di posizioni	3	
Orientazioni del campione	Radiale, tangenziale e verticale rispetto all'asse del braccio, a 120° ciascuna	
Parametri valutati	Errore di posizione PL	
	Errore di dimensione PS	
	Errore di forma PF	
	Errore di indicazione E	
Elemento associato	Sfera di best fit ai minimi quadrati	

Tabella 4-17 - Proposta di confronto tra sonda a contatto e sonda laser

Errore valutato	Parametro	Riferimento normativo (se contemplato)	Scelta adottata
Errore di indicazione E	Errore	ISO 10360-2	E= L _m - L _n
		ASME B89.4.22	
		VDI/VDE 2617-9	
	Campione	ISO 10360-2	Blocchetti piano paralleli
		ASME B89.4.22	
		VDI/VDE 2617-9	
	Numerosità e dimensioni dei campioni	ISO 10360-2	5 lunghezze: 100 mm 200 mm 300 mm 400 mm 500 mm
		ASME B89.4.22	
		VDI/VDE 2617-9	
	Posizione dei campioni	ISO 10360-2	7 posizioni Vicino e lontano rispetto alla base del braccio
		ASME B89.4.22	
		VDI/VDE 2617-9	
	Orientazione dei campioni	ISO 10360-2 VDI/VDE 2617-9	Radiale, Tangenziale, Verticale e Diagonale
		ASME B89.4.22	
	Misure	ISO 10360-2	3 misure di ogni lunghezza per ogni posizione
		ASME B89.4.22	
VDI/VDE 2617-9			
Fissaggio dei campioni		Supporto dedicato	
Piano di lavoro		Piano di granito	
Allineamento del campione	ISO 10360-2	1P	
Numeri di punti di tastatura	B89.4.22	5 punti su ciascuna faccia del piano	
Orientazione del tastatore rispetto alla superficie di misura nella presa punto		Inclinato di 30° per il piano	

Errore valutato	Parametro	Riferimento normativo (se contemplato)	Scelta adottata
	Elementi geometrici da ricavare		Piano
	Calcolo distanza		Tra elementi geometrici
	Modalità contatto tra tastatore e campione		Rimanere in contatto durante l'acquisizione
	Stima incertezza	ISO/DTS 23165	Tabella PUMA
Errore di forma PF	Errore	ISO 10360-2	$P = R_{i \max} - R_{i \min}$
		VDI/VDE 2617-9	Errore di forma
			ΔX e ΔY del centro dell'anello
	Campione	ISO 10360-2	Anello
		VDI/VDE 2617-3	
		VDI/VDE 2617-9	
	Numeri di punti di tastatura per sfera	ISO 10360-2	10 cerchi costruiti per 4 punti ciascuno, 1 cerchio passante per tutti e 40 i punti
		VDI/VDE 2617-9	
Errore T_{ij} in scansione	ISO 10360-4	T_{ij}	
Campione	ISO 10360-4	Anello	
Errore di posizione PL	Errore		Deviazione massima delle coordinate di un punto
	SPAT	B89.4.22	Cono solo per la qualifica del tastatore
		VDI/VDE 2617-9	
Errore di dimensione PS	Errore		Diametro della sfera
	Campione	VDI/VDE 2617-9	Anello
		VDI/VDE 2617-3	
		ISO 10360-2	
B89.4.22			

Tabella 4-18 - Prove sperimentali effettuate su braccio articolato di misura

Errore valutato		Riferimento normativo (se contemplato)	Scelta adottata
Errore di dimensione SD	Campione	VDI/VDE 2634-2	Artefatto 2
		ISO 10360-7	
	Numerosità e dimensioni dei campioni	VDI/VDE 2634-2	Artefatto 2
		ISO 10360-7	
	Posizione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	3 posizioni
		ISO 10360-7	
	Orientazione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	Non specificate
		ISO 10360-7	
	Misure	VDI/VDE 2634-2	1 scansione per posizione
		ISO 10360-7	
Elementi geometrici da ricavare		Sfere e piani ai minimi quadrati	
Errore di forma o tastatura R	Errore	VDI/VDE 2634-2	R
	Campione	VDI/VDE 2634-2	Artefatto 2
		Costruttore FARO	
	Posizione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	3 posizioni
Costruttore FARO			
Errore di planarità R_E	Errore	VDI/VDE 2634-2	R_E
	Campione	VDI/VDE 2634-2	Artefatto 1
	Posizione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	2 posizioni
	Orientazione dei campioni	VDI/VDE 2634-2	Lontano e vicino
	Numerosità e dimensioni dei campioni	VDI/VDE 2634-2	Artefatto 1
Risoluzione in Z	Campione		Artefatto 1
Precisione in Z	Campione		Artefatto 1

Tabella 4-19 - Prove sperimentali effettuate su laser

4.6 Conclusioni

La validazione della procedura di taratura di un braccio di misura articolato con integrato un sistema ottico a scansione ha evidenziato l'accuratezza del sistema e i parametri che influenzano le misurazioni e ha concesso di definire i parametri per caratterizzare la precisione di uno strumento in grado di misurare a contatto e non a contatto

L'attività svolta ha permesso di operare delle scelte per definire la procedura di taratura che sono di seguito elencate:

Braccio di misura articolato:

- ✓ Applicazione della Norma ISO 10360-2 per il calcolo dell'errore di indicazione E per misure dimensionali, impiegando 5 blocchetti piano paralleli disposti in 7 posizioni diverse del volume di lavoro del braccio. In ciascuna posizione vengono misurati tre volte.
- ✓ Applicazione della Norma VDI/VDE 2617-3 per le misure di forma, utilizzando un anello posizionato in tre posizioni e orientazioni del volume di lavoro del braccio. Vengono calcolati gli errori di taratura P, gli errori di ripetibilità ΔX e ΔY e gli errori di taratura in scansione T_{ij} .

Sonda non a contatto - laser:

- ✓ Misurazione dell'Artefatto 1, costituito da quattro blocchetti piano paralleli che generano dei gradini, in due posizioni del volume di lavoro. I parametri che vengono ricavati servono a valutare la precisione e la risoluzione in z dello strumento .
- ✓ Misurazione dell'Artefatto 2 in tre posizioni del volume di lavoro con tre diverse orientazioni.

Braccio articolato con integrato un sistema laser

- ✓ Applicazione della Norma ISO 10360-7 che prevede il controllo delle prestazioni mediante un confronto tra i diversi sistemi di misura, rilevando lo stesso artefatto. Il campione utilizzato è una ball bar, come consigliato nella Norma B89.4.22 per la verifica delle prestazioni dei bracci articolati, e nella VDI/VDE 2634-2 per la verifica delle prestazioni dei sistemi non a contatto. Vengono misurate due ball bar di differente lunghezza in tre differenti posizioni e orientazioni del volume di lavoro del braccio, prima con la sonda a contatto, attraverso 25 punti e poi con il laser. Si valutano e confrontano gli errori di posizione, di dimensione, di forma e di indicazione, come indicato nella VDI/VDE 2634-2.

Oltre alle scelta dei campioni in base alla normativa, se presente, sono state definite tutte le variabili operative quali allineamento dei campioni, posizionamento degli stessi e strategia di misura.

Conclusioni

In questo lavoro è stato illustrato lo stato dell'arte relativamente alle tipologie delle macchine di misura a coordinate, con un approfondimento ai bracci di misura, e dei sistemi ottici.

Per raggiungere l'obiettivo, ossia realizzare una procedura per la taratura di bracci articolati di misura che integrano un sistema ottico a scansione, sono state analizzate e descritte le normative vigenti relative alla tipologia di strumenti in oggetto.

Si è constatato che per tali strumenti non c'è una norma internazionale e i costruttori adottano procedure interne e diverse tra loro.

Poiché attualmente non esistono standard riconosciuti a livello internazionale per la valutazione dell'accuratezza, della ripetibilità e della risoluzione degli Scanner 3D, l'utilizzatore deve di volta in volta mettere a punto delle tecniche per valutare l'affidabilità dei dati rispetto a ciò che viene misurato.

Infatti la bibliografia esaminata non tratta sistemi di questo tipo, e le metodologie e approccio inerenti a sistemi di misura così costituiti sono molto recenti, soprattutto se confrontati con la nascita delle macchine di misura a coordinate e con lo sviluppo dei sistemi laser, risalente agli anni '50.

Per quanto riguarda i bracci articolati di misura sono presenti delle norme nazionali, in particolare l'americana ASME B89.4.22 e la tedesca VDI/VDE 2617 Part 9. È stata valutata l'applicabilità delle norme ed è stata scelta una procedura per l'esecuzione di prove mirate a comprendere e valutare le prestazioni dello strumento.

Si è evidenziato come la linea guida VDI/VDE 2634 Part 2:2002, pur rappresentando l'unica norma in materia, non è completamente applicabile al sistema ottico a disposizione. Pertanto tale norma è stata analizzata e in parte applicata, ma allo stesso tempo sono stati introdotti dei parametri nuovi per la valutazione dell'accuratezza dei sistemi laser. A questo scopo si è resa necessaria la progettazione di due artefatti, volti a evidenziare il comportamento e la precisione dello strumento ottico.

La realizzazione di artefatti, inoltre li rende utilizzabili sia per la taratura di strumenti ottici sia per un confronto tra strumenti per il rilievo tridimensionale.

Quindi, al termine di questo lavoro è stata validata una procedura per la verifica delle prestazioni di sistemi di misura costituiti da bracci articolati che integrano un sistema di scansione non a contatto. Essa consiste in una serie di sequenze operative che permettono di valutare le prestazioni del braccio articolato con la sonda a contatto e della sonda laser separatamente. Solo successivamente, mediante la rilevazione di ball bar calibrate, viene effettuato un confronto tra i dati ottenuti con entrambe le sonde.

In essa sono stati definiti i campioni materiali da utilizzare, le modalità di misurazione e la ripetibilità delle prove necessarie.

Tale procedura mira a determinare la precisione e l'accuratezza di misura dei sistemi oggetto di questo lavoro con l'obiettivo di diventare modello standardizzato di specifica tecnica, adatta ad essere utilizzata dal costruttore all'utilizzatore affinché sia possibile il confronto tra questi strumenti di misura.

Infine in Appendice viene proposta una valutazione e una stima dell'incertezza di misura secondo la norma ISO/DTS 23165. L'incertezza è un problema molto vasto, influenzato da

molti fattori che vanno dalla tipologia dell'oggetto in analisi fino alle procedure di lavoro utilizzate. Tali fattori sono stati tenuti in considerazione nelle prove sperimentali.

Bibliografia

Kunzmann H., Trapet E., Wäldele F., *Results of the International Comparison of Ball Plate Measurements in CIRP and WECC*, Annals of the CIRP, Vol. 44/1/1995

Savio E., De Chiffre L., *An Artefact for traceable freeform measurements on Coordinate measuring machine_2002_Precision Engineering*

Osawa S., Busch K., Franke M., Schwenke H., *Multiple orientation technique for the calibration of cylindrical workpieces on CMMs_2005_Precision Engineering*

Balsamo A., Franke M., Trapet E., Wäldele F., De Jonge L., Vanherck P., *Results of the CIRP-Euromet Intercomparison of Ball Plate-Based Techniques for Determining CMM Parametric Errors*, Annals of the CIRP, Vol. 46/1/1997

Pedrini G., Gaspar J., Wu T., Osten W., Paul O., *Calibration of optical systems for the measurement of microcomponents_2009_Optics and Lasers in Engineering*

Liebrich T., Bringmann B., Knapp W., *Calibration of a 3D-ball plate_2009_Precision Engineering*

He B.W., Li Y.F., *Camera calibration from vanishing points in a vision system_2008_Optics and Laser Technology*

Hansen H.N., De Chiffre L., *A combined optical and mechanical reference artefact for coordinate measuring machines*, Annals of the CIRP, Vol. 46/1/1997

Trapet E., Wäldele F., *A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools_1991_Measurement Vol 9 No 1*

Kruth J.P., Vanherck P., De Jonge L., *Self-calibration method and software error correction for three-dimensional coordinate measuring machines using artefact measurements_1994_Measurement Vol 14*

Komori M., Li H., Takeoka F., Osawa S., Sato O., Kiten T., Shirasaki D., Kondo Y., *Design and Error Analysis of Multiball Artifact Composed of Simple Features to Evaluate Pitch Measurement Accuracy_2009_Journal of Mechanical Design*

Qiang Z., Wei W., *Calibration of laser scanning system based on a 2D ball plate_2009_Measurement Vol 42*

Savio E., De Chiffre L., Schmitt R., *Metrology of freeform shaped parts*, Annals of the CIRP, Vol. 56/2/2007

Bringmann B., Besuchet J.P., Rohr L., *Systematic evaluation of calibration methods_2008_CIRP Annals - Manufacturing Technology 57*

Lei W.T., Hsu Y.Y., *Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: design and modelling_2002_* International Journal of Machine Tools and Manufacture

Lei W.T., Hsu Y.Y., *Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: errors estimation_2002_* International Journal of Machine Tools and Manufacture

Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitt R., Delbressine F., *Geometric error measurement and compensation of machines - An update_2008_* CIRP Annals - Manufacturing Technology 57

Sartori S., Cresto P.C., Di Ciommo M., Kancheva T.K., *A way to improve the accuracy of a coordinate measuring machine_1988_* Measurement Vol 6 No 2

Kunzmann H., Trapet E., Wäldele F., *Concept for the traceability of Measurements with Coordinate Measuring Machines,* 7th International Precision Engineering Seminar (kobe), May 1993

Thompson M.N., Cogdell J.D., *Measuring probe alignment errors on cylindrical coordinate measuring machines_2007_* Precision Engineering 31

Agapiou J.S., Du H., *Assuring the day-to-day accuracy of coordinate measuring machines - A comparison of Tools and procedure_2007_* Journal of Manufacturing Processes, Vol 9 No 2

Barreiro J., Martinez S., Labarga J.E., Cuesta E., *Validation of an information model for inspection with CMM_2005_* International Journal of Machine Tools and Manufacture

Abbe M., Takamasu K., Ozono S., *_2003_* Reliability on calibration of CMM, Measurement 33

Cauchick-Miguel P., King T., Davis J., *CMM verification: a survey_1997_* Measurement Vol 17 No 1

Sartori S. Zhang G.X., *Geometric error measurement and compensation of machines,* Annals of CIRP Vol 44/2/1995

Romano D., Vicario G., *Inspecting geometric tolerances: uncertainty analysis in position tolerances control on Coordinate Measuring Machine_2002_* Statistical Methods and Application

Pereira P.H., Hocken R.J., *Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machines_2007_* Precision Engineering

Cauchick-Miguel P., King, A. Abackerli T., *A review on methods for probe performance verification_1998_* Measurement 23

Van Gestel N., Cuypers S., Bleys P., Kruth J-P., *A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs_2009_* Optics and Lasers in Engineering 47

Beraldin J-A., Gaiani M., *Valutazione delle prestazioni di sistemi di acquisizione tipo 3D active vision: alcuni risultati_2003_DDD* Rivista trimestrale de Disegno Digitale e Design. Ed Poli. Design, Y.2 n.5

Antunes S.D., Vicente M.A.F., *Local and global calibration of coordinate measuring machine_2001_* Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology V

Takatsuji T., Osawa S., T. Kurosawa. *Uncertainty analysis of calibration of geometrical gauge_2002_* Precision Engineering

Godina A., Acko B., Druzovec M., *New approach to uncertainty evaluation in the calibration of gauge block comparator_2007_* Measurement 40

Savio E., *Uncertainty in testing the metrological performances of coordinate measuring machines*, Annals of CIRP Vol 55/1/2006

Meyer V. R., *Measurement uncertainty (Review)_2007_* Journal of Chromatography

Takamasu K., Takahashi S., Abbe M., Furutani R., *Uncertainty estimation for coordinate metrology with effects of calibration and form deviation in strategy of measurement_2008_* Measurement Science and Technology

Dhanish P.B., Mathew J., *Effect of CMM point coordinate uncertainty on uncertainties in determination of circular features_2006_* Measurement 39

Weckenmann A., Knauer M., *The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM-measurements*, Annals of CIRP Vol 47/1/1998

Feng C.J., Saal A.L., Salsbury J.G., Ness A.R., Lin G.C.S., *Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study_2007_* Precision Engineering

De Chiffre L., Hansen H.N., Morace R.E., *Comparison of Coordinate Measuring Machines using an Optomechanical Hole Plate, 2005*

Santolaria J., Yagüe J.A., Jiménez R., Aguilar J.J., *Calibration based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines_2009_* Precision Engineering

Yagüe J.A., Aguilar J.J., Albajez J.A., Santolaria J., *Characterisation of 1D opto-electronic sensors and their application to angular self centring probes for machine-tool verification_2008_* Measurement 41

Rohling R., Munger P., Hollerbach J.M., Peters T., *Comparison of relative accuracy between a mechanical and an optical position tracker for image guided neurosurgery_1995_* Journal of image guided

Yagüe J.A., Velázquez J., Albajez J.A., Aguilar J.J., Lope M.A., Santolaria J., *Development and calibration of self-centring probes for assessing geometrical errors of machines_2009_* Measurement Science and Technology 20

Gao G., Wang W., Lin K., Chen Z., *Kinematic Calibration for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Base on Particle Swarm Optimization_2009_ICICTA*

Santolaria J., Aguilar J.J., Yagüe J.A., Pastor J., *Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines_2008_Precision Engineering 32*

Santolaria J., Guillomía D., Cajal C., Albajez J.A., Aguilar J.J., *Modelling and Calibration Technique of Laser Triangulation Sensors for Integration in Robot Arms and Articulated Arm Coordinate Measuring Machines_2009_Sensor*

Kim K-D., Chung S-C., *On machine inspection system accuracy improvement using an artifact_2003_Journal of Manufacturing Systems*

Santolaria J., Aguilar J.J., Brau A., Brosted F.J., *Performance evaluation of probing system in data capture for kinematic parameter identification and verification of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines_2009_IMEKO World Congress*

Kovač I, Frank A. *Testing and calibration of coordinate measuring arms_2001_Precision Engineering*

Piratelli-Filho A., Lesnau G.R., *Virtual spheres gauge for coordinate measuring arms performance test_2009_Measurement*

Neuschaefer-Rube U., Neugebauer M., Ehrig W., Bartscher M., Hilpert U., *Tactile and optical microsensors-test procedures and standards_2008_Measurement Science and Technology*

Santolaria J. , Aguilar J. J., Cajal C., Lope M.A., *A crenellated-object-based intrinsic and extrinsic calibration method for laser stripe sensors integration in articulated coordinate measurement arms_2006_IMEKO*

Nardelli V.C., Donatelli G.D., *A simple solution to interim check of coordinate measuring machines_2006_IMEKO*

A. Farooqui S.A., Morse E.P., *Alternative artifacts for evaluating scanning CMM performance_2004_ASPE*

Bringmann B., Kung A., *A Measuring Artefact for true 3D Machine Testing and Calibration_2005_Manufacturing Technology*

Folkert K. F., Dow T.A., Garrard K., *Metrology artifact design_2004_ASPE*

De Chiffre L., Hansen H. N., Morace R. E., *Comparison of Coordinate Measuring Machines using an Optomechanical Hole Plate_2005_Manufacturing Technology*

Shimajima K., Furutani R., Takamasu K., Araki K., *The estimation method of uncertainty of articulated coordinate measuring machines_2003_IMEKO*

Wei Z., Zhou F., Zhang G., *3D coordinates measurement based on structured light sensor_2005_Sensors and Actuators A Physical*

El-Hakim S.F., Beraldin J.-A., Blais F., *A Comparative Evaluation of the Performance of Passive and Active 3 D Vision Systems_1995_St Petersburg conference on Digital Photogrammetry*

Kruth J.-P., Zhou L., Van den Bergh C., Vanherck P., *A Method for Squareness Error Verification on a Coordinate Measuring Machine_2003_Advanced Manufacturing Technology*

Wendt A., *A concept for feature based data registration by simultaneous consideration of laser scanner data and photogrammetric images_2007_ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*

Godin G., Beraldin J.-A., Taylor J., Cournoyer L., Rioux M., El-Hakim S., Baribeau R., Blais F., Boulanger P., Domey J., Picard M., *Active Optical 3D Imaging for Heritage Applications_2002_Computer Graphics in Art and Archaeology*

Feng H.-Y., Liu Y., Xi F., *Analysis of digitizing errors of a laser scanning system_2001_Precision Engineering*

Zhang G., Wei Z., *A novel calibration approach to structured light 3D vision inspection_2002_Optics & Laser Technology*

Van Gestel N., Cuypers S., Bleys P., Kruth J.-P., *A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs_2009_Optics and Lasers in Engineering*

Albamont J., Goshtasby A., *A range scanner with a virtual laser_2003_Image and Vision Computing*

Muralikrishnan B., Sawyer D., Blackburn C., Phillips S., Borchardt B., Estler W.T., *ASME B89.4.19 Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in laser trackers_2009_Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*

Persson A., Andersson M., Oden A., Sandborg-Englund G., *A three dimensional evaluation of a laser scanner and a touch probe scanner_2006_The Journal of Prosthetic Dentistry*

Qiuang Z., Wei W., *Calibration of laser scanning system based on a 2D ball plate_2009_Measurement*

Blais F., Beraldin J.-A., El-Hakim S., Cournoyer L., *Comparison of Pose Estimation Methods of a 3D Laser Tracking System Using Triangulation and Photogrammetry Techniques_2001_SPIE Proceedings*

Forbes A.B., Hughes B., Sun W., *Comparison of measurements in co-ordinate metrology_2009_Measurement*

Lee K.-H., Ehsani R., *Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns_2008_* Computers and Electronics in Agriculture

Zhao F., Xu X., Xie S.Q., *Computer Aided Inspection Planning The state of the art_2009_* Computers in Industry

Shinozaki M., Kusanagi M., Umeda K., Godin G., Rioux M., *Correction of color information of a 3D model using a range intensity image_2009_* Computer Vision and Image Understanding

El-Hakim S., Beraldin J.-A., Blais F., *Critical Factors and Configurations for Practical 3D Image Based Modeling_2003_* 6th Conference on 3D Measurements Techniques

Taylor J., Beraldin J.-A., Godin G., Baribeau R., Cournoyer L., Blais F., El-Hakim S., Picard M., Rioux M., Domey J., *Culture as a Driving Force for Research and Technology Development A Decade's Experience of Canada's NRC 3D Technology_2002_* EVA

Beraldin J.A., *Digital 3D Imaging and Modeling A Metrological Approach_2008_* NRC Publications Archive

Su X., Zhang Q., *Dynamic 3 D shape measurement method A review_2010_* Optics and Lasers in Engineering

eraldin J.A., Gaiani M., *Evaluating the Performance of Close Range 3D Active Vision System for Industrial Design Application_2005_* SPIE

Pfeifer N., Briese C., *Geometrical Aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning_2007_* IAPRS

owitzsch S., Häusler G., *How much 3D information are we allowed to know and how much may a 3D sensor cost?_2006_* ICO Topical Meeting on Optoinformatics Information Photonics

Boehler W., Marbs A., *Investigating Laser Scanner Accuracy_2003_* The International Archives of Photogrammetry

Godin G., Blais F., Cournoyer L., Beraldin J.-A., Domey J., Taylor J., Rioux M., El-Hakim S., *Laser Range Imaging in Archaeology Issue and Results_2003_* ACVA

Dogan B., Horstmann M., *Laser scanner displacement measurement at high temperatures_2003_* International Journal of Pressure Vessels and Piping

Dorsch R.G., Häusler G., Herrmann J.M., *Laser Triangulation fundamental uncertainty in distance measurement_1994_* Applied Optics

Blais F., Beraldin J.-A., El-Hakim S., Godin G., *New Development in 3D Laser Scanners From Static to Dynamic Multi-Modal Systems_2006_* 6th Conference on 3D Measurements Techniques

Sun X., Rosin P.L., Martin R.R., Langbein F.C., *Noise analysis and synthesis for 3D laser depth scanners_2009_Graphical Models*

Grudzien W., Sonntag A., Seliger G., *Operating system for laser scanners_1998_Journal of Materials Processing Technology*

Klinger P., Veit K., Häusler G., Karbacher S., Laboureaux X., *Optical 3D Sensors for Real Applications–Potentials and Limits_2003_8th International rendez vous for 3D digitisation and modelling professionals Paris*

Cuyppers W., Van Gestel N., Voet A., Kruth J.-P., Mingneau J., Bleys P., *Optical measurement techniques for mobile and large scale dimensional metrology_2009_Optics and Lasers in Engineering*

Schwenke H., Neuschaefer-Rube U., Pfeifer T., Kunzmann H., *Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering_2002_CIRP Annals Manufacturing Technology*

Hocken R.J., Chakraborty N., Brown C., *Optical Metrology of Surfaces_2005_CIRP Annals Manufacturing Technology*

Chen F., Brown G.M., Song M., *Overview of three dimensional shape measurement using optical methods_2000_Optical Engineering*

Beraldin J.-A., El-Hakim S., Blais F., *Performance Evaluation of Three Active Vision Systems Built at the National Research Council of Canada_1995_Optical 3D Measurement Techniques III*

Weckenmann A., Estler T., Peggs G., McMurtry D., *Probing Systems in Dimensional Metrology_2004_CIRP Annals Manufacturing Technology*

Axelsson P., *Processing of laser scanner data-algorithms and applications_1999_ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*

Raguse K., Wiggenhagen M., *Quality parameters of the optical data channel used in impacts tests_2003_poster session*

Blais F., Beraldin J.-A., El-Hakim S., *Range Error Analysis of an Integrated Time of Flight, Triangulation, and Photogrammetric 3D Laser Scanning System_2001_SPIE*

Blais F., Beraldin J.-A., El-Hakim S., Cournoyer L., *Real Time Geometrical Tracking and Pose Estimation Using Laser Triangulation and Photogrammetry_2001_Third International Conference on 3DIM*

Beraldin J.-A., Blais F., Boulanger P., Cournoyer L., Domey J., El-Hakim S., Godin G., Rioux M., Taylor J., *Real world modelling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures_2000_ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*

Godin G., Hébert P., Masuda T., Taubin G., *Special issue on new advances in 3D imaging and modeling_2009_Computer Vision and Image Understanding*

Xiang S., Chen S., Wu X., Ding X., Zheng X., *Study on fast linear scanning for a new laser scanner_2010_Optics & Laser Technology* 42

Blais F., Beraldin J.A., Cournoyer L., El-Hakim S., Domey J., Rioux M., Christie I., Serafini R., Pepper G., MacLean S.G., Laurin D., *Target Tracking, Object Pose Estimation, and Effects of the Sun on the NRC 3 D Laser Tracker_2001_Sisth International SAIRAS*

Blais F., Beraldin J.A., Cournoyer L., El-Hakim S., Picard M., Domey J., Rioux M., *The NRC 3 D Laser Tracking System IIT's Contribution to the International Space Station Project_2001_Workshop of Italy-Canada on 3D Digital Imaging and Modeling Application of Heritage, Industry, Medicine & Land. Padova, Italy April 3-4, 2001*

Schön N., Gall P., Häusler G., *Three dimensional acquisition of colored objects_2002_In 8. Workshop Farbbildverarbeitung*

Häusler G., *Three Dimensional Sensors-Potentials and Limitations_1999_Handbook of Computer Vision and Applications*

Beraldin J.A., Picard M., El-Hakim S., Godin G., Borgeat L., Blais F., Paquet E., Rioux M., Valzano V., Bandiera A., *Virtual Reconstruction of Heritage Sites Opportunities and Challenges Created by 3D Technologies_2005_The International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*

Santolaria J., Pastor J.J., Brosed F.J., Aguilar J. *A one-step intrinsic and extrinsic calibration method for laser line scanner operation in coordinate measuring machines_2009_Measurement Science and Technology*

Zexiao X., Qiumei Z., Guoxiong Z., *Modeling and calibration of a structured-light-sensor-based five-axis scanning system_2004_Measurement*

Che C., Ni J., *A ball-target-based extrinsic calibration technique for high-accuracy 3D metrology using off-the-shelf laser-stripe sensors_2000_Precis Eng* 24

Zexiao X., Chengguo Z., Qiumei Z., *A simplified method for the extrinsic calibration of structured-light sensors using a single-ball target_2004_International Journal of Machine Tools and Manufacture*

Pasqualetto A., *"Criteri per la valutazione dell'accuratezza dei sistemi ottici di misura tridimensionale"* Tesi di laurea in Ingegneria meccanica, Padova, A.A. 2004-2005

Bruna G., *"Metodologia per la verifica delle prestazioni di uno scanner tridimensionale"* Tesi di laurea in Ingegneria aerospaziale, Padova, A.A. 2003-2004

Benà C., *"Sviluppo della procedura di taratura per bracci articolati di misura a coordinate presso un laboratorio metrologico"*, Tesi di laurea in Ingegneria meccanica, Ferrara, A.A. 2006-2007

Polerà F., *"Validazione di un sistema di visione per il rilievo di forme tridimensionali"*, Tesi di laurea in Ingegneria meccanica, Pisa, A.A. 2004-2005

Guidi G., Russo M., Beraldin JA., *"Modellazione 3D e acquisizione poligonale"*, McGraw-Hill, Milano, 2010

Gasvik K.J., *"Optical Metrology"* Third Edition, John Wiley & Sons, LTD 2002

ISO/TS 15530-3:2003, *"Geometrical Product Specification (GPS) – Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for evaluation of the uncertainty of measurement – Part 3: Use of calibrated workpieces or standards"*, International Organization for Standardization, 2003.

UNI EN ISO 14253-1:2001, *"Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) – Verifica mediante misurazione dei pezzi e delle apparecchiature per misurazioni – Regole decisionali per provare la conformità o non conformità rispetto alle specifiche"*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2001

UNI CEI ENV 13005:2000, *"Guida all'espressione dell'incertezza di misura"*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2000

ISO 10360-1:2000 *"Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 1: Vocabulary"*, International Standard Organization, 2000

ISO 10360-2:2001 *"Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 2: CMMs used for measuring linear dimension"* International Standard Organization, 2001

ISO 10360-3:2000 *"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"*, International Standard Organization, 2000

ISO 10360-4:2000 *"Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 4: CMMs used in scanning measuring mode"*, International Standard Organization, 2000

ISO 10360-5:2000 *"Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 5: CMMs using multiple-stylus probing systems"*, International Standard Organization, 2000

ISO 10360-6:2001 *"Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 6: Estimation of errors in computing Gaussian associated features"*, International Standard Organization, 2001

VDI/VDE 2617 part 6:1997, *"Accuracy of coordinate measuring machines – Characteristic parameters and their verification – Coordinate measuring machines with optical probes – basics"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 1997

VDI/VDE 2617 part 6.1:1998, *"Accuracy of coordinate measuring machines – Characteristic parameters and their verification – Coordinate measuring machines with optical probes – Sensors for 2D measurement"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 1998

VDI/VDE 2617 part 6.2:1999, *"Accuracy of coordinate measuring machines – Characteristic parameters and their verification – Coordinate measuring machines with optical probes – Optical sensors for one-dimensional distance measurement"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 1999

VIM *"International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology"*, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2nd edition, 1993

DIN 32877:2000, *"Optoelectronic measurement of distance, profile and form"*, DIN, 2000.

VDI/VDE 2634 part 1:2002, *"Optical 3D measuring systems – Image systems with point-by-point probing"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 2002.

VDI/VDE 2634 part 2:2002, *"Optical 3D measuring systems – Optical systems based on area scanning"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 2002

VDI/VDE 2617-9:2006 *"Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten Kenngrößen und deren Prüfung Annahme- und Bestätigungsprüfung von Gelenkarm-Koordinatenmessgeräten"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 2006

VDI/VDE 2617 Blatt 2.1: 2001-10 *"Accuracy of coordinate measuring machines - Parameters and their reverification - Code of practice for the application of DIN EN ISO 10360-2 for length measurement"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 2001

VDI/VDE 2617 Blatt 3: 1989-05 *"Accuracy of coordinate measuring machines; characteristic parameters and their checking; components of measurement deviation of the machine"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 1989

VDI/VDE 2617 Blatt 4: 1989-09 *"Accuracy of coordinate measuring machines; characteristics and their checking; rotary tables on coordinate measuring machines"*, VDI Verein Deutscher Ingenieure, 1989

ANSI/ASME B89.4.10360.2-2008, *"Acceptance Test and Reverification Test for Coordinate Measuring Machines (CMMs) – Part 2: CMMs Used for Measuring Linear Dimensions"*, American National Standards Institute, 2008

ANSI/ASME B89.4.10:2000, *"Methods for Performance Evaluation of Coordinate Measuring System Software"*, American National Standards Institute, 2000

ANSI/ASME B89.4.22:2004, *"Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines"*, American National Standards Institute, 2004

5 Appendici

Appendice 1 - Campioni utilizzati

Blocchetti piano paralleli

I blocchetti piano paralleli (o pianparalleli) sono campioni materiali di lunghezza. Il loro impiego principale è il trasferimento della unità di lunghezza, e possono quindi servire per collaudare strumenti di misura o per realizzare calibri fissi ad uso comparatori e distanziatori. La norma ISO 3650 specifica le caratteristiche dei blocchetti a sezione rettangolare (vedere Figura 5-1), di lunghezza nominale compresa tra 0,5 e 1000 mm, e definisce come lunghezza del blocchetto “la distanza tra un punto su di una faccia ed una superficie piana e rigida dello stesso materiale e delle stesse caratteristiche alla quale aderisce l’altra faccia” (tenendo quindi in conto lo spessore dello strato di adesione e le deformazioni per effetto dell’adesione).

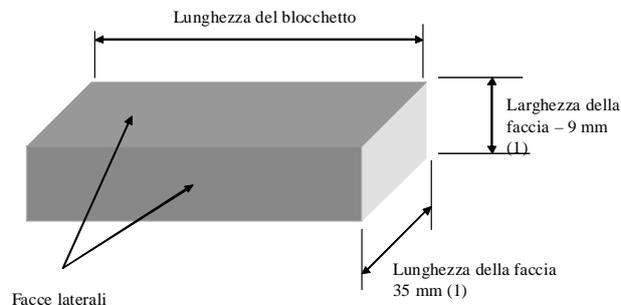


Figura 5-1 - Dimensioni e nomenclatura di blocchetti piano paralleli a sezione rettangolare secondo ISO 3650

I blocchetti piano paralleli hanno infatti la caratteristica di potere essere uniti in combinazioni di differenti elementi, grazie alla loro capacità di adesione reciproca. L’adesione si realizza accostandoli e sfregandoli leggermente, senza esercitare pressione. La forza di attrazione supera largamente gli $0,5 \text{ kg/cm}^2$, ed è generata dall’attrazione tra le molecole del materiale di base e di uno strato intermedio di umidità e di residui chimici della lavorazione (dello spessore di $0,01 \div 0,02 \text{ }\mu\text{m}$) rimasti presenti nei micro-avvallamenti superficiali. A causa di tale forza, e della compenetrazione delle micro-rigature superficiali, i blocchetti accoppiati riducono la loro lunghezza iniziale di circa $0,01 \text{ }\mu\text{m}$.

Sono reperibili in dimensioni da 25 a 2000 mm, con limiti di errore di lunghezza espressi tipicamente dalla formula:

$E = \pm(1+L/50)$, con E in micrometri ed L in millimetri.

Sempre la norma ISO 3650 specifica le caratteristiche delle facce laterali: planarità, parallelismo, perpendicolarità rispetto alla faccia qualificata (valori in micrometri, L in millimetri). Ad esempio:

Planarità	80 μm fino a L = 100 mm 80+0,08 L μm oltre 100 mm di lunghezza
Parallelismo	40 μm fino a 100 mm 40+0,04 L μm oltre 100 mm

Perpendicolarità 50 µm per L = 10÷25 mm
 100 µm per L = 60 ÷ 150 mm
 180 µm per L = 400 ÷ 1000 mm

Le caratteristiche dei blocchetti piano paralleli utilizzati in fase sperimentale sono ricavabili dai loro rispettivi certificati di taratura SIT e riportati in Tabella 5-1.

Blocchetto	Caratteristica	Valore
100 mm	Lunghezza nominale	100,0001 mm
	Incertezza espansa di taratura	0,21 µm
	Tolleranza di perpendicolarità della superficie usata per calcolare l'asse rispetto a quella di misura	15,3 µm
	Tolleranza di parallelismo tra le due facce di misura	0,07 µm
200 mm	Lunghezza nominale	200,0001 mm
	Incertezza espansa di taratura	0,66 µm
	Tolleranza di perpendicolarità della superficie usata per calcolare l'asse rispetto a quella di misura	2,7 µm
	Tolleranza di parallelismo tra le due facce di misura	0,09 µm
300 mm	Lunghezza nominale	300,0003 mm
	Incertezza espansa di taratura	0,69 µm
	Tolleranza di perpendicolarità della superficie usata per calcolare l'asse rispetto a quella di misura	4,2 µm
	Tolleranza di parallelismo tra le due facce di misura	0,10 µm
400 mm	Lunghezza nominale	400,0000 mm
	Incertezza espansa di taratura	0,72 µm
	Tolleranza di perpendicolarità della superficie usata per calcolare l'asse rispetto a quella di misura	1,2 µm
	Tolleranza di parallelismo tra le due facce di misura	0,12 µm
500 mm	Lunghezza nominale	499,9995 mm
	Incertezza espansa di taratura	0,75 µm
	Tolleranza di perpendicolarità della superficie usata per calcolare l'asse rispetto a quella di misura	1,3 µm
	Tolleranza di parallelismo tra le due facce di misura	0,14 µm

Tabella 5-1 - Caratteristiche blocchetti piano paralleli



Figura 5-2 - Blocchetti piano paralleli

Anello

I calibri fissi sono campioni materiali di dimensioni e caratteristiche geometriche (di forma, di orientamento). Essi materializzano le forme o le dimensioni da controllare, e sono usabili o in maniera diretta (come la serie infinita dei tamponi) o come elemento di riferimento per misure di comparazione. Sono apprezzati per le caratteristiche di:

- ✓ stabilità
- ✓ portabilità
- ✓ indipendenza da fonti di alimentazione
- ✓ capacità di controllare forme complesse
- ✓ simulazione delle condizioni di utilizzo od assemblaggio
- ✓ convenienza economica

Sono costruiti con materiali che assicurano sia la stabilità dimensionale, sia la resistenza all'usura, alla corrosione ed all'azione degli agenti esterni. A seconda dei casi si utilizzano materiali quali: acciai legati e inox, con trattamenti di finitura quali la cromatura o la deposizione di carburi, granito o sinterizzati ceramici.



Figura 5-3 - Anello di riscontro

Le misurazioni sono state effettuate in una sala metrologica la quale garantisce un adeguato livello di controllo nella temperatura e nell'umidità dell'ambiente. La temperatura è impostata su $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ durante tutto l'anno e viene conservata grazie a un sistema di condizionamento dedicato, per cui l'influenza della temperatura dall'esterno e il livello di dispersione dall'interno risultano trascurabili. L'umidità invece è mantenuta pari a $50\% \pm 20\%$.

La sperimentazione condotta sulla caratterizzazione degli strumenti in un tale ambiente garantisce una buona qualità del risultato.

L'anello utilizzato nelle prove e proposto nella procedura ha le seguenti proprietà ricavabili dal certificato di taratura:

Caratteristica	Valore
Diametro nominale	45,002 mm
Incertezza espansa di taratura sul diametro	0,79 μm
Errore di forma	0,4 μm
Incertezza espansa associata all'errore di forma	1,0 μm
CTE del materiale	$1,15 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Incertezza sul CTE	$5,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Tabella 5-2 - Caratteristiche anello di riscontro

Certificare un oggetto significa conoscere le sue dimensioni e le caratteristiche geometriche, e queste devono avere una precisione superiore di almeno un ordine di grandezza rispetto alle prestazioni dello strumento che si vuole analizzare.

Tale certificazione può avvenire direttamente dal processo di produzione dell'oggetto oppure mediante strumenti di rilievo, come le macchine di misura a coordinate.

Le misure degli artefatti quali ball bar, Artefatto 1 e Artefatto 2 sono state effettuate con un sistema CMM (Prismo Vast 7, Zeiss) che ha permesso di certificarne con precisione micrometrica le dimensioni, in modo da poter confrontare in un secondo momento questi dati di riferimento con quelli rilevati dal braccio di misura sia con tastatore a contatto che con scanner a triangolazione.

Ball bar

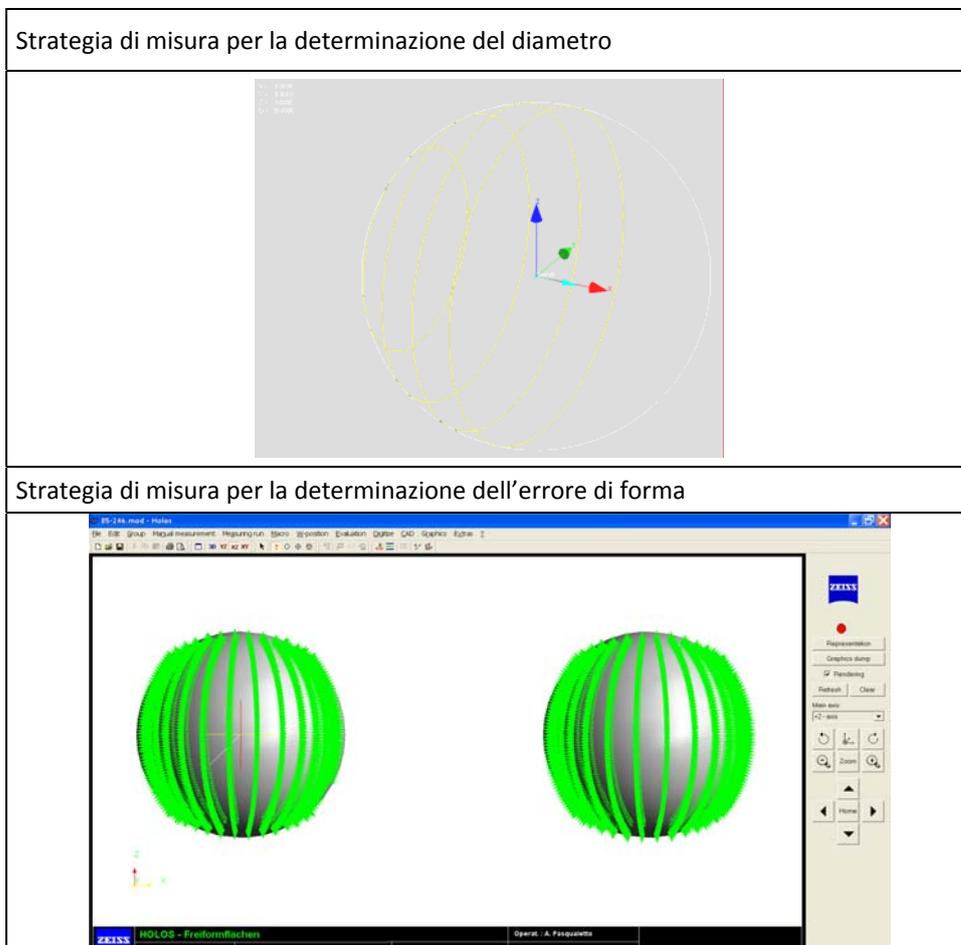
Sono sfere per cuscinetti, al fine di ottenere artefatti con un'adeguata accuratezza di forma. Infatti dalle schede di calibrazione risultano caratterizzate da errori di sfericità che vanno da $0,8 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$

Le sfere sono state unite in coppie di eguale diametro attraverso uno stelo in acciaio.

Infine le ball bar sono state verniciate con lo scopo di garantire una protezione alla corrosione e di generare una superficie opaca, richiesta per la scansione con il laser.

In

Tabella 5-3 sono presentati i valori nominali, ottenuti mediante misurazione effettuata con una macchina di misura a scansione, la Prismo Vast 7 della Zeiss ad una temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.



Valori di calibrazione delle ball bar

<i>Ball Bar</i>		BB /15-32
Distanza centri sfere		35,457 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
Sfera Left	Diametro	15,039 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,014 ± (2,7x10 ⁻³) mm
Sfera Right	Diametro	15,032 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,012 ± (2,7x10 ⁻³) mm
<i>Ball Bar</i>		BB /30-55
Distanza centri sfere		58,221 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
Sfera Left	Diametro	30,081 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,010 ± (2,7x10 ⁻³) mm
Sfera Right	Diametro	30,063 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,012 ± (2,7x10 ⁻³) mm
<i>Ball Bar</i>		BB /55-82
Distanza centri sfere		89,755 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
Sfera Left	Diametro	55,073 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,008 ± (2,7x10 ⁻³) mm
Sfera Right	Diametro	55,123 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,014 ± (2,7x10 ⁻³) mm
<i>Ball Bar</i>		BB /55-123
Distanza centri sfere		130,089 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
Sfera Left	Diametro	55,059 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,018 ± (2,7x10 ⁻³) mm
Sfera Right	Diametro	55,117 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,014 ± (2,7x10 ⁻³) mm
<i>Ball Bar</i>		BB /85-246
Distanza centri sfere		253,155 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
Sfera Left	Diametro	85,793 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,017 ± (2,7x10 ⁻³) mm
Sfera Right	Diametro	85,789 ± [(2+L/350)x10 ⁻³] mm
	Errore di forma	0,010 ± (2,7x10 ⁻³) mm

Tabella 5-3 - Caratteristiche delle ball bar

Artefatto 1

Con riferimento a tale lavoro è realizzato un campione, definito Artefatto 1, in Figura 5-4, che è costituito da quattro blocchetti piano paralleli accostati per formare dei gradini.

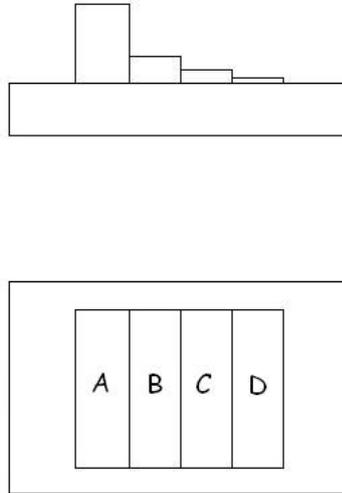


Figura 5-4 - Artefatto 1

Le dimensioni nominali di tali blocchetti si ricavano dal certificato di taratura e sono riportati in Tabella 5-4.

Blocchetto	Dimensione [mm]	Planarità [mm]
A	11,9998	0,001
B	3,0000	0,001
C	1,7000	0,002
D	1,1000	0,001

Tabella 5-4 - Valori nominali dei blocchetti

Artefatto 2

Il secondo campione di riferimento che si è reso necessario realizzare è costituito da una serie di sfere calibrate per cuscinetti.

Le sfere, in origine lucide, sono state sabbiate per rendere più agevoli le operazioni di scansione. Come già sottolineato sono note le difficoltà che si manifestano nell'acquisire superfici metalliche lucide, con proprietà ottiche non adatte ad essere scansionate perché troppo riflettenti.

Rispetto all'Artefatto 1, questo non è possibile ricoprirlo di uno strato di spray opacizzante perché le superfici sono più piccole e complesse e la misura risulterebbe troppo influenzata. Le caratteristiche geometriche nominali del campione sono riportate in Tabella 5-5.

Di ciascuna sfera è stato misurato il diametro e le coordinate della posizione del centro sfera, rispetto ad un sistema di riferimento realizzato utilizzando il piano superiore come passe

primario e origine dell'asse z, il piano ortogonale a questo come secondario o fasatura e infine il cilindro esterno come origine delle coordinate x e y.

Inoltre sono state calcolate le distanze tra i centri sfera di tutte le sfere rispetto alla Sfera 3 e alla Sfera 2. I valori delle distanze spaziali sono riportate in

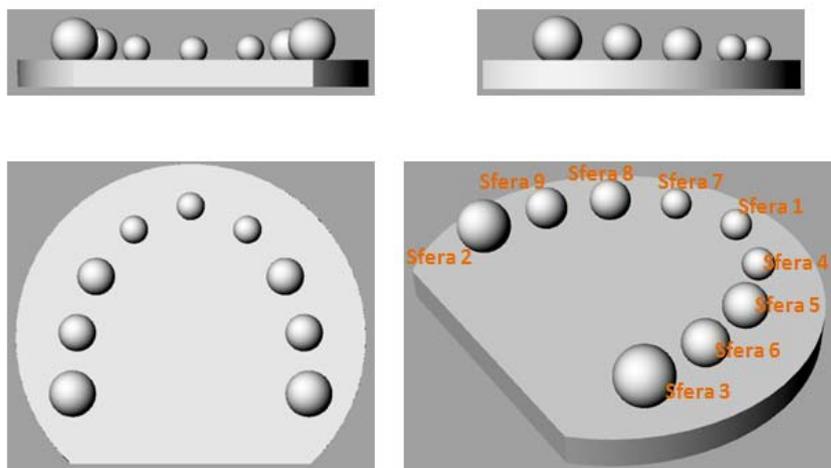


Figura 5-5 - Modello 3D del campione Artefatto 2

Numero Sfera	Raggio nominale [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1	2,999	-0,208	21,956	2,097
2	4,993	-24,809	-17,886	4,486
3	4,989	24,519	-18,252	4,488
4	3,001	11,234	17,466	2,075
5	3,997	19,321	7,258	3,335
6	3,991	23,687	-4,838	3,366
7	3,000	-11,722	17,281	1,991
8	3,996	-19,354	7,350	3,367
9	3,994	-23,491	-4,851	3,365
10	3,997	-0,002	-18,017	3,372

Tabella 5-5 - Caratteristiche geometriche del campione di riferimento Artefatto 2

Distanze tra centri	Sfera 2 [mm]	Sfera 3 [mm]
Sfera 1	46,886	47,263
Sfera 2	-	49,329
Sfera 3	49,329	-
Sfera 4	50,543	38,184
Sfera 5	50,803	26,059
Sfera 6	50,233	13,486
Sfera 7	37,606	50,816
Sfera 8	25,842	50,809
Sfera 9	13,149	49,858

Tabella 5-6 - Distanze spaziali tra centri di sfere

Appendice 2 - Incertezza di misura di una macchina di misura a coordinate

Incetezza di misura secondo ISO/DTS 23165

Per provare la conformità o la non conformità di una macchina di misura all'atto di accettazione o riverifica, la ISO 10360-2 richiede l'applicazione di un criterio di decisione, standardizzato dalla ISO 14253-1. Questo criterio si basa a sua volta sulla definizione e sulla valutazione completa dell'incertezza di misura incorsa durante il test. E' necessario però distinguere i contributi di incertezza apportati dalla macchina da quelli pertinenti al test stesso; solo questi ultimi devono essere considerati componenti del budget di incertezza. Infatti, durante l'accettazione o la riverifica si devono indagare le prestazioni della macchina, cioè gli errori di tastatura P e di indicazione di lunghezza E, e non la dimensione del misurando, che è un campione già tarato in precedenza. Tutto ciò che concorre all'indeterminatezza di tale campione, a prescindere dalla macchina col quale è misurato, è stato oggetto di questa analisi. In pratica, l'incertezza qui ricavata dà un'indicazione su quanto possa essere veritiera un'informazione quantitativa ottenuta su un dato misurando durante il test.

La valutazione del budget di incertezza è stata inizialmente effettuata seguendo scrupolosamente il documento ISO/DTS 23165, "Guide to the evaluation of CMM test uncertainty". Si tratta di una guida all'applicazione del test standardizzato dalla ISO 10360-2 in riferimento alla valutazione dell'incertezza del test, come richiesto dalla ISO 14253-1. Il documento si basa sulle norme elencate in bibliografia, e riguarda in generale ogni tipo di CMM. Successivamente, tramite la campagna sperimentale descritta nel capitolo 4, è stato svolto uno studio specifico per il calcolo dell'incertezza applicabile a bracci articolati di misura a coordinate, modificando opportunamente il metodo di valutazione indicato dal documento ISO/DTS 23165.

Infine, sono stati calcolati i valori di incertezza da applicare ai campioni previsti dalla procedura di taratura per bracci.

Generalmente i principali fattori che contribuiscono al valore dell'incertezza sono pochi e tipici, ma in ogni circostanza è bene accertarsi che essi siano tenuti a valori minimi e che non ce ne siano altri meno evidenti. L'analisi dei vari contributi può essere effettuata in diversi modi ed è soggetta all'esperienza ed al buon senso dell'operatore; si è cercato di rendere questo processo il più standardizzato possibile, per limitare i margini di errore.

Si distinguono due tipi di incertezza, quella associata all'errore di tastatura, definita U(P), e quella associata all'errore di misura di lunghezza, U(E).

Per calcolare U(P), l'equazione raccomandata è del tipo:

$$U(P) = u(P) * k = \sqrt{F^2 + u^2(F)} * k$$

dove:

F = errore di forma,

u(F) = incertezza standard associata all'errore di forma, constatati nel certificato di taratura del campione;

k = tipicamente 2, fattore che delinea l'intervallo di confidenza [in questo caso circa 95 %].

Il calcolo di U(E) prevede la seguente equazione:

$$U(E) = u(E) * k = \sqrt{u^2(\varepsilon_{cal}) + u^2(\varepsilon_{\alpha}) + u^2(\varepsilon_t) + u^2(\varepsilon_{align}) + u^2(\varepsilon_{fixt})} * k$$

dove:

- ✓ u(ε_{cal}) = incertezza associata all'errore di taratura del blocchetto campione;
- ✓ u(ε_α) = incertezza associata all'errore sul valore immesso del coefficiente di espansione termica (CTE) α del materiale del campione;
- ✓ u(ε_t) = incertezza associata all'errore sul valore immesso della temperatura del campione durante la prova;
- ✓ u(ε_{align}) = incertezza associata all'errore di allineamento del campione;
- ✓ u(ε_{fixt}) = incertezza associata all'errore di fissaggio del campione;
- ✓ k = fattore di intervallo di confidenza, pari a 2.

Queste incertezze dipendono in larga parte da indici riportati nei certificati di taratura dei blocchetti piano paralleli, dell'anello campioni E del termometro usato durante la prova, mentre gli unici dati che l'operatore deve curarsi di annotare sono le temperature rilevate all'inizio e alla fine di ogni ciclo di misura.

I contributi all'incertezza sono elencati di seguito e riassunti nella :

- u(ε_{cal}) deriva dall'incertezza di taratura di ogni campione;
- u(ε_α) dipende dalla lunghezza nominale del campione, dalla sua temperatura media durante il test e dall'incertezza del suo coefficiente di dilatazione (CTE);
- u(ε_t) è dovuta all'incertezza di taratura del termometro, al CTE del materiale del campione e alla massima differenza di temperatura registrata nel corso delle prove (T_{max}-T_{min} si tratta di un valore abbastanza elevato, che garantisce un buon margine di sicurezza);
- u(ε_{align}) dipende dalla formula:

$$u(\varepsilon_{align}) = \sqrt{u^2(e_{cos}) + u^2(e_{parall})}$$

dove:

- u(e_{cos}) = incertezza associata all'errore del coseno; essa deriva, a sua volta, dall'incertezza associata all'errore di tastatura u(P) e dalla tolleranza geometrica superfici del campione usate per l'allineamento.

Si è utilizzato come valore la tolleranza di perpendicolarità della faccia più estesa dei blocchetti (usata appunto come asse principale nell'allineamento) rispetto alla faccia meno estesa (su cui è effettuata la misura); specificamente per l'anello di prova questo valore risulta trascurabile, essendo scelto come asse primario l'asse del cilindro costruito su due sezioni estreme dell'anello.

- u(e_{parall}) = incertezza associata all'errore di parallelismo. È composta dalla tolleranza di parallelismo tra le facce di misura del blocchetto, e dalla distanza minima fra i punti

tastati per definire l'asse del campione: per i calcoli si è ritenuto adeguato un valore pari a due terzi dello spessore minimo.

- $u(\epsilon_{\text{fixt}})$ è stimata in base all'esperienza dell'operatore, infatti gli errori di fissaggio non sono calcolabili matematicamente e solo l'esperienza può consentirne una veritiera valutazione. Generalmente contribuisce in modo minimo se i campioni sono fissati correttamente e non sono presenti deformazioni.

Contributi principali	Fattori che intervengono nel calcolo dei contributi principali
$u(\epsilon_{\text{cal}})$	Incertezza di taratura campione
$u(\epsilon_{\alpha})$	Lunghezza nominale, T media, incertezza CTE
$u(\epsilon_t)$	Incertezza termometro, CTE, $T_{\text{max}}-T_{\text{min}}$
$u(\epsilon_{\text{align}})$	$u(e_{\text{cos}})$ U(P), tolleranza di perpendicolarità
	$u(e_{\text{parall}})$ Tolleranza di parallelismo, distanza minima punti tastati
$u(\epsilon_{\text{fixt}})$	Esperienza

Tabella 5-7 - Contributi di incertezza per CMM secondo ISO/DTS 23165

Adattando la ISO/DTS 23165 ai bracci articolati di misura è apparsa evidente la necessità di modificare delle considerazione e dei parametri sopra esposti. Il confronto tra i contributi all'incertezza associata alle misure effettuate con una Macchina di Misura a Coordinate e un braccio articolato di misura è presentato in Tabella 5-8.

Dal confronto emerge che alcune componenti d'incertezza rimangono inalterate, poiché non dipendono dalla tipologia della macchina, ma da fattori indipendenti come le caratteristiche dei campioni di riscontro, dal termometro, dal piano di lavoro e dalla temperatura ambiente. I parametri che vanno aggiunti sono i seguenti:

$u(\epsilon_{\text{posiz}})$ = incertezza associata all'errore di configurazione della macchina durante la presa di un singolo punto. Infatti, per una CMM tradizionale, la qualifica del tastatore definisce univocamente l'inclinazione dello stelo e la posizione di tutti gli assi nel momento dell'approccio con il componente in tutti i punti del volume di lavoro, ossia esiste un'unica configurazione della macchina che permette la singola presa punto. Invece il tastatore di un braccio articolato può raggiungere il medesimo punto con una combinazione infinita di inclinazioni e rotazioni dei giunti. Tutto ciò amplifica il problema della ripetibilità e incide sull'incertezza finale.

$u(\epsilon_{\text{force}})$ = incertezza associata all'errore sulla forza di tastatura. Mentre una CMM tradizionale tasta con forza costante o comunque controllata, nel braccio di misura, essendo uno strumento manuale, la forza varia in base all'operatore, alle sue condizioni e alla posizione dei campioni, apportando un'influenza preponderante sull'incertezza finale. Tale contributo si può suddividere ulteriormente in 3 contributi:

$u(O)$ = è un contributo di incertezza legato alla forza di tastatura. Infatti la forza di contatto tra tastatore e campione non è mai uniforme ed essa comporta deformazioni soprattutto dello stelo del tastatore, o lievi spostamenti del campione, che si ripercuotono sugli errori di fissaggio e di allineamento.

$u(D)$ = è un contributo legato all'accessibilità dell'oggetto a causa della configurazione del tastatore, che comporta una pressione di tastatura diversa.

$u(F_{grav})$ = tale contributo è legato alla forza di gravità che in determinate posizioni contribuisce positivamente a quella di tastatura (se l'elemento è rivolto verso l'alto) o negativamente (elemento da tastare rivolto verso il basso).

Componenti di incertezza	Fattori che influiscono sulle componenti di incertezza	CMM	Bracco	Definizione
$u(\epsilon_{cal})$	-	X	X	Incertezza di taratura del campione
$u(\epsilon_{\alpha})$	$u(\alpha)$	X	X	Incertezza standard del coefficiente di espansione termica del campione
	L nominale	X	X	Lunghezza o diametro nominale del campione
	T	X	X	Temperatura rilevata del campione, dipende dalla temperatura della sala metrologica
$u(\epsilon_t)$	$u(t)_{cal}$	X	X	Incertezza di taratura del termometro
	α	X	X	Coefficiente di espansione termica del campione
	ΔT_t	X	X	Massima differenza di temperatura rilevata durante la prova, dipende dalla temperatura della sala metrologica
$u(\epsilon_{align})$ $u(\epsilon_{cos})$	F	X	X	Errore di forma dell'anello
	$u(F)$	X	X	Incertezza associata all'errore di forma dell'anello
	T_{perp}	X	-	tolleranza geometrica sulle superfici del campione usate per l'allineamento
	L_{align}	X	X	distanza minima tra i punti tastati per definire l'asse del campione, dipende dal metodo di allineamento
$u(\epsilon_{align})$ $u(\epsilon_{parall})$	T_{parall}	X	X	Tolleranza in variazione di lunghezza del campione
$u(\epsilon_{fixt})$	-	X	X	Incertezza legata al fissaggio del campione, dipende dall'esperienza dell'operatore e dalla stabilità del piano di lavoro.
$u(\epsilon_{posiz})$	-	-	X	Incertezza legata alla posizione della macchina durante la presa di un singolo punto
$u(\epsilon_{force})$	$u(O)$	-	X	Incertezza legata alla variabilità con cui l'operatore esplica la forza di contatto tra tastatore e campione Incertezza legata alla difficoltà di raggiungere i punti da
	$u(D)$	-	X	tastare sul campione, dipende dal collocamento dei campioni
	$u(F_{grav})$	-	X	Incertezza legata al contributo della forza di gravità alla forza di contatto col campione

Tabella 5-8 - Confronto tra i contributi all'incertezza

I valori dell'incertezza espansa calcolati per ciascun campione sono riportati in Tabella 5-9, mentre nei grafici in Figura 5-6 è possibile valutare in percentuale il peso relativo di ognuno dei principali contributi all'incertezza. Si può constatare che le incertezze dovute al fissaggio, alla posizione della macchina e soprattutto alla forza di contatto hanno un peso preponderante. La temperatura genera un contributo basso poiché le prove sono avvenute in una sala metrologica che mantiene una temperatura costante e prossima ai 20°C e la differenza massima di temperatura rilevata è pari a 0,50 °C

Campione	Incertezza espansa [μm]
BBP 100 mm	12,3
BBP 200 mm	12,4
BBP 300 mm	12,4
BBP 400 mm	12,4
BBP 500 mm	12,5
Anello 45 mm	12,1

Tabella 5-9 - Valori di incertezza

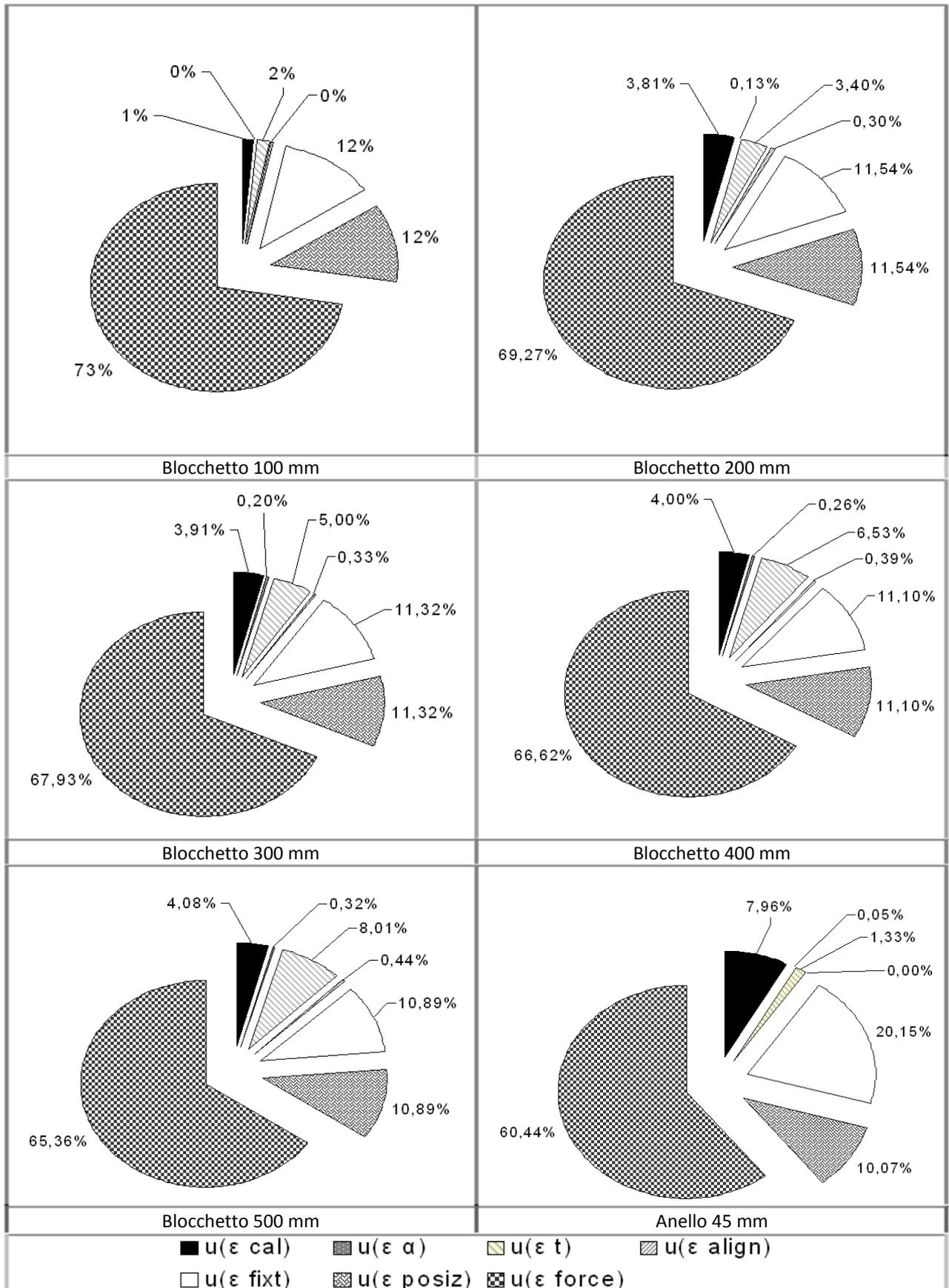


Figura 5-6 - Principali contributi di incertezza

Appendice 3 - Scheda tecnica dello strumento utilizzato

Lo strumento utilizzato per la campagna di misure è il braccio di misura *Cam2 Arm Platinum* a sette gradi di libertà, dotato di sonda a contatto e la possibilità di integrare una sonda non a contatto, la Laser ScanArm V3 CAM2.

Le caratteristiche tecniche sono riportate nella seguente scheda tecnica.



CAM2® Laser ScanArm® V3

Specifiche Laser Line Probe V3

Precisione: $\pm 35\mu\text{m}$

Ripetibilità: $35\mu\text{m}, 2\sigma$

Stand-off: 95mm

Profondità di campo: 85mm

Ampiezza effettiva di scansione: Distanza minima 34mm
Distanza massima 60mm

Punti per banda: 640 punti/banda

Frequenza di misurazione: 30 bande al secondo = 19.200 punti al secondo

Laser: 660nm, CDRH Class II/IEC Class 2M

Peso: 370g

Performance (senza contatto)

Modello	1,8m (6ft.)	2,4m (8ft.)	3,0m (10ft.)	3,7m (12ft.)
Fusion	0,081mm (0.0032in.)	0,086mm (0.0034in.)	0,124mm (0.0049in.)	0,159mm (0.0063in.)
Platinum	0,061mm (0.0024in.)	0,065mm (0.0026in.)	0,087mm (0.0034in.)	0,108mm (0.0043in.)
Quantum	0,054mm (0.0021in.)	0,055mm (0.0022in.)	0,074mm (0.0029in.)	0,086mm (0.0034in.)

Performance (contatto)

Modello (7 assi)	Test di ripetibilità puntuale (max-min)/2			Deviazione volumetrica massima			Peso del braccio		
	Fusion	Platinum	Quantum	Fusion	Platinum	Quantum	Fusion	Platinum	Quantum
1,8m (6ft.)	0,046mm (0.0018in.)	0,026mm (0.0010in.)	0,019mm (0.0007in.)	$\pm 0,064\text{mm}$ ($\pm 0.0025\text{in.}$)	$\pm 0,037\text{mm}$ ($\pm 0.0015\text{in.}$)	$\pm 0,027\text{mm}$ ($\pm 0.0011\text{in.}$)	9,5 kg (21lbs.)	9,5kg (21lbs.)	9,5kg (21lbs.)
2,4m (8ft.)	0,051mm (0.0020in.)	0,030mm (0.0012in.)	0,020mm (0.0008in.)	$\pm 0,071\text{mm}$ ($\pm 0.0028\text{in.}$)	$\pm 0,043\text{mm}$ ($\pm 0.0017\text{in.}$)	$\pm 0,028\text{mm}$ ($\pm 0.0012\text{in.}$)	9,75kg (21.5lbs.)	9,75kg (21.5lbs.)	9,75kg (21.5lbs.)
3,0m (10ft.)	0,089mm (0.0035in.)	0,052mm (0.0020in.)	0,039mm (0.0015in.)	$\pm 0,124\text{mm}$ ($\pm 0.0049\text{in.}$)	$\pm 0,073\text{mm}$ ($\pm 0.0029\text{in.}$)	$\pm 0,055\text{mm}$ ($\pm 0.0022\text{in.}$)	9,98kg (22lbs.)	9,98kg (22lbs.)	9,98kg (22lbs.)
3,7m (12ft.)	0,124mm (0.0049in.)	0,073mm (0.0029in.)	0,051mm (0.0020in.)	$\pm 0,175\text{mm}$ ($\pm 0.0069\text{in.}$)	$\pm 0,103\text{mm}$ ($\pm 0.0041\text{in.}$)	$\pm 0,072\text{mm}$ ($\pm 0.0028\text{in.}$)	10,21kg (22.5lbs.)	10,21kg (22.5lbs.)	10,21kg (22.5lbs.)

Metodi di test CAM2 Arm - (I metodi di test sono un sottogruppo di quelli indicati nella normativa 889.4.22). Test di ripetibilità puntuale (max-min)/2: Il tastatore del CAM2 Arm viene posizionato entro una sede conica e i singoli punti vengono misurati da diverse direzioni. Ogni singola misura puntuale viene analizzata come serie di deviazioni. Questo test costituisce un metodo per determinare la ripetibilità di macchine di misura articolate. Deviazione volumetrica massima: Stabilita utilizzando campioni di lunghezza tracciabile, misurati in diverse posizioni e orientamenti su tutto il volume di lavoro del CAM2 Arm. Questo test costituisce un metodo per determinare la precisione di macchine di misura articolate.

Appendice 4 - Grafici relativi alle prove sperimentali relativi all'Artefatto 2

Tutti i valori nei grafici sono espressi in millimetri.

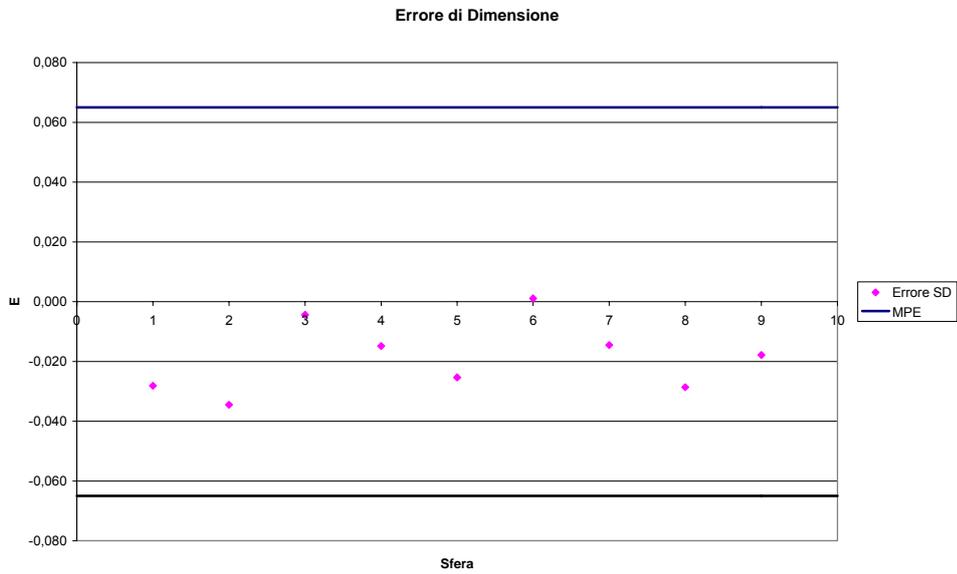


Figura 5-7 - Errore di dimensione delle sfere in Posizione 2

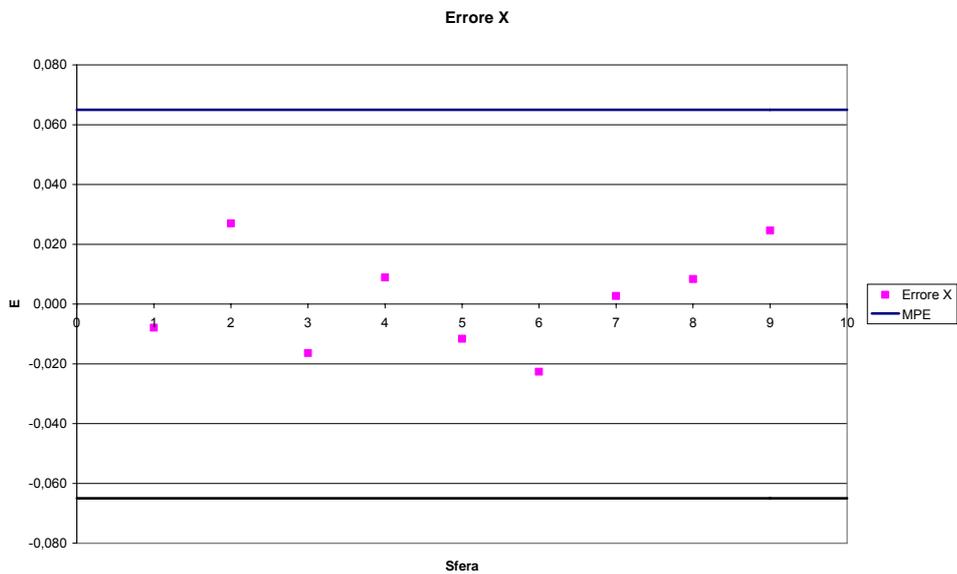


Figura 5-8 - Errore di posizione in X delle sfere in Posizione 2

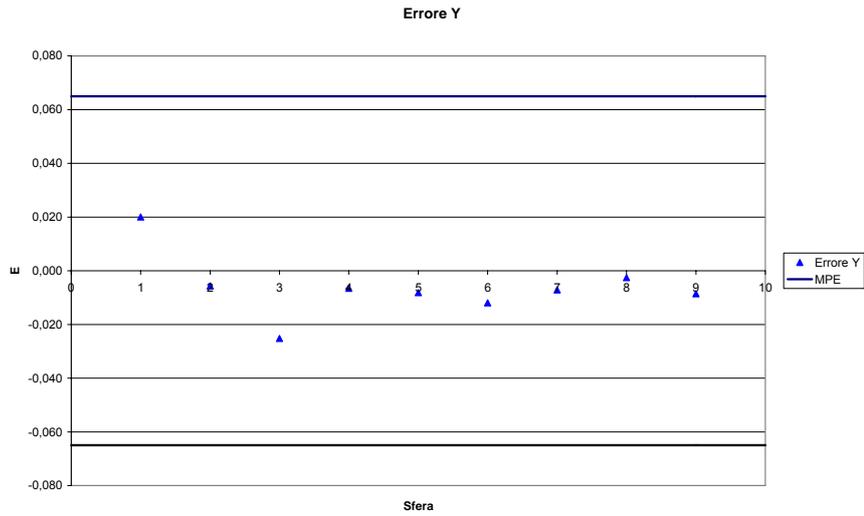


Figura 5-9 - Errore di posizione in Y delle sfere in Posizione 2

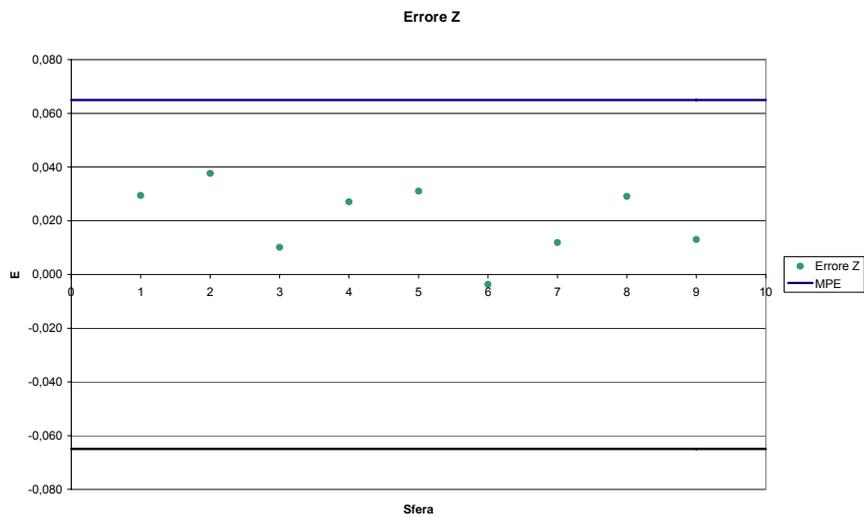


Figura 5-10 - Errore di posizione in Z delle sfere in Posizione 2

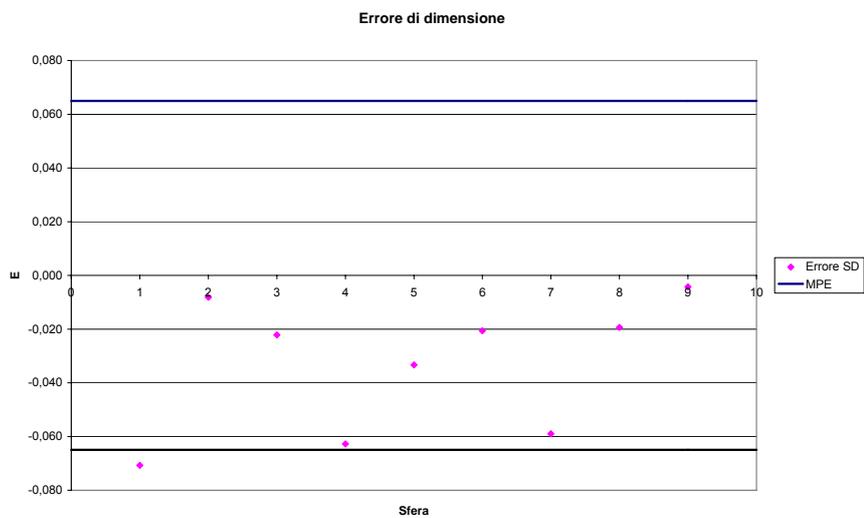


Figura 5-11 - Errore di dimensione delle sfere in Posizione 3

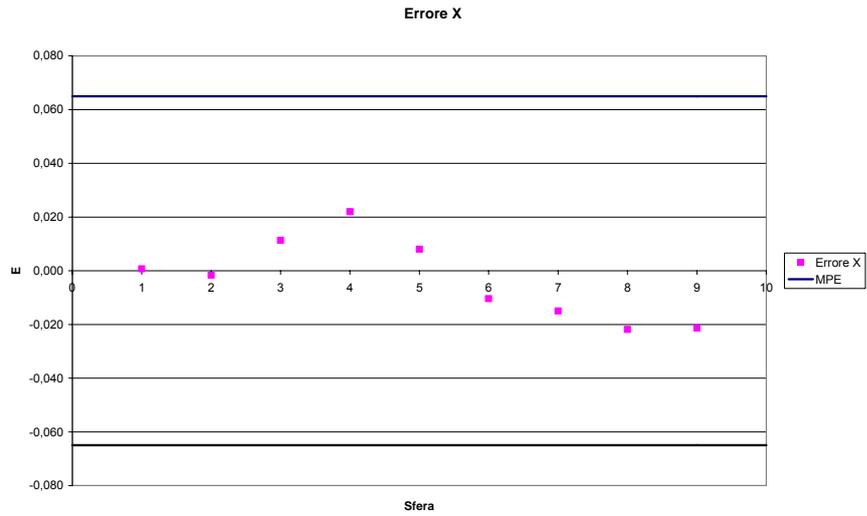


Figura 5-12 - Errore di posizione in X delle sfere in Posizione 3

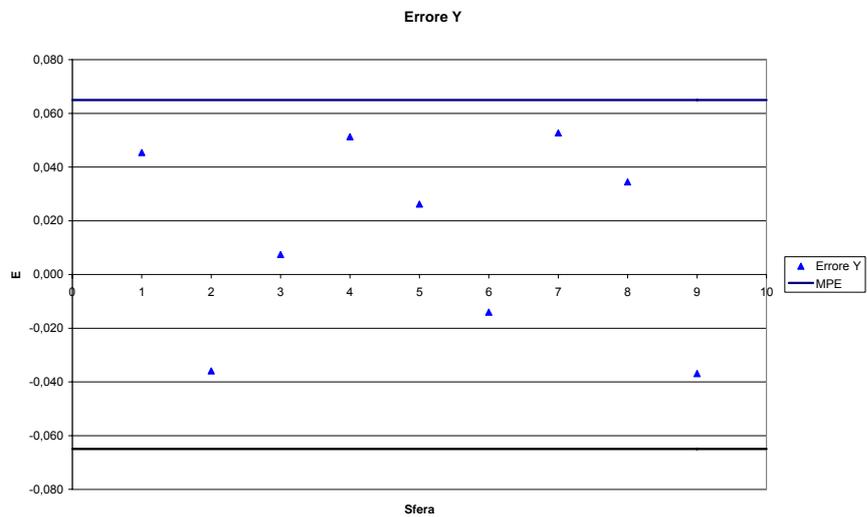


Figura 5-13 - Errore di posizione in Y delle sfere in Posizione 3

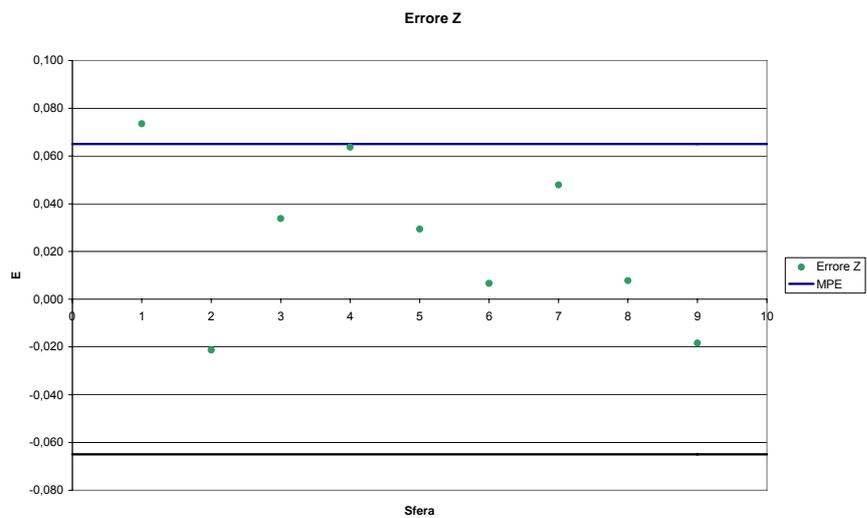


Figura 5-14 - Errore di posizione in XZ delle sfere in Posizione 3 }