

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



Tesi di Laurea di II livello

**Sviluppo di un algoritmo riferibile per la registrazione di topografie
per la caratterizzazione di superfici nello spazio**

Relatore:

Prof. Maurizio Galetto

Correlatore:

Dott. Giacomo Maculotti

Candidato: Marina Mondello

Matricola: 330444

Anno Accademico 2024-2025

Sommario

Capitolo 1 Introduzione	1
1.1. Contesto e motivazioni	1
1.1.2. Tolleranze delle superfici libere	2
1.2. Caratterizzazione di forme libere.....	3
1.2.2. Classificazione e requisiti dei sistemi di misurazione	6
1.3. La Sfida della Caratterizzazione di Superfici Freeform.....	9
1.3.2. Il Progetto Europeo DI-VISION e la Riferibilità Metrologica	11
1.4. Obiettivi della Tesi.....	11
Capitolo 2 Metrologia delle Superfici Freeform	13
2.1. Definizione e Applicazioni.....	13
2.1.2. Definizione della forma nominale.	13
2.2. Sfide Metrologiche	15
2.2.2. Larga scala.....	15
2.2.3. Piccola scala:	19
2.2.4. Criticità comuni e considerazioni generali.....	19
2.3. Tecniche di Acquisizione 3D piccola scala.....	20
2.3.2. Strategie di misurazione e campionamento	21
2.3.3. Sistemi a Contatto.....	22
2.3.4. Sistemi ottici	23
2.3.5. Integrazione su Sistemi Robotizzati	25
2.4. Fusione di dati multisensore.....	25
2.4.2. Metodi di fusione dei dati	27
2.4.3. Metodi di stima.....	27
2.4.4. Metodi di inferenza.....	28
2.5. Algoritmi di Registrazione e Stitching	29
2.5.2. ICP: spiegazione fondamenti matematici, vantaggi e limiti.....	31
2.5.3. Metodi di Ottimizzazione.....	33
2.6. Allineamento dei dati misurati alla geometria nominale	34
2.6.2. Allineamento grezzo	34
2.6.3. Allineamento fine	35
2.6.4. Valutazione dei risultati e parametri applicativi	36
Capitolo 3 Metodologia	37
3.1. La Piattaforma Sperimentale Mind4Lab	38
3.2. Metodologia di Calibrazione del Cobot	38
3.2.2. Controllo metrologico e analisi dell'incertezza.....	39
3.3. La Strategia di Acquisizione	40

3.3.2. Filtraggio	41
3.4. Colocalizzazione e Stitching	42
3.4.2. Aspetti tecnici del framework basato su scikit-optimize	44
3.4.3. Descrizione del flusso di allineamento delle nuvole di punti	45
3.5. Dataset iniziale costruito	48
3.6. ICP- Spiegazione della validazione	49
3.6.2. Applicazione algoritmo ICP	50
Capitolo 4 Validazione sperimentale su oggetti reali	52
4.1. Caso di Studio 1: Lastra con Incisione “4”	52
4.1.2. Implementazione della metodologia.....	52
4.1.3. Filtraggio dei dati	53
4.1.4. Definizione dello spazio di ricerca	53
4.1.5. Sviluppo e implementazione del caso studio	54
4.1.6. Assunzioni e aspetti considerati nell’implementazione	56
4.1.7. Risultati	58
4.1.8. ICP- Validazione	59
4.2 Caso di Studio 2: Lastra con Incisione “7”	61
4.2.2. Acquisizione dati.....	61
4.2.3. Scelta parametri e calcolo overlap	62
4.2.4. Risultati	63
4.2.5. Risultati ICP	64
4.3. Caso studio con piano inclinato:.....	66
4.3.2. Scelta parametri.....	66
4.3.3. Risultati	67
4.3.4. Risultati ICP (caso piano inclinato).....	68
4.4. Caso di Studio 3: Superfici Freeform	69
4.4.2. Caso studio: Inserto da taglio	70
4.4.3. Acquisizione dataset di un oggetto freeform	71
4.4.4. Metodologia applicata.....	71
4.4.5. Risultati	72
4.4.6. Validazione- CMM.....	73
4.4.7. Test di ipotesi	75
Capitolo 5 Discussione generale.....	78
5.1 Interpretazione dei Risultati	78
5.1.2. Incertezza, errori e riferibilità	78
5.2 Vantaggi e Limiti	79
5.3. Confronto con lo Stato dell’Arte	80

5.3.2. Innovazione nella metrologia Industriale: Algoritmi Auto-Adattivi e Sistemi di Misura Intelligenti	82
Capitolo 6 Conclusioni	84
Bibliografia.....	86
APPENDICE.....	88
Caso 1: Incisione “4”	88
Codice ICP	92

Indice delle Figure

Figura 1: Modello completo di un A380.....	2
Figura 2: Fotocamera Polaroid SX-70 (1972).....	2
Figura 3: Parte di uno strumento di formatura della lamiera con elementi liberi	2
Figura 4: freeform critico [1].	3
Figura 5: Definizione della tolleranza del profilo non correlata a un riferimento [1].	3
Figura 6: Rappresentazione della complessità geometrica.....	4
Figura 7: Classificazione in relazione al settore industriale.....	5
Figura 8: Esempio di un CMM dotato di una sonda di misurazione a contatto mentre scansiona una superficie libera su uno stampo.....	6
Figura 9: Schema dei principali tipi di acquisizione effettuabili con una CMM.....	7
Figura 10: Principio del sistema di misurazione di uno scanner a luce blu [2].	8
Figura 11: Il principio di base dell'interferometria CGH. [1]	8
Figura 12: Esempio di rappresentazione NURBS; u e v rappresentano i parametri di posizione di un punto sulla superficie [1].	14
Figura 13: Inserto da taglio (caso studio) ed esempio di superficie NURBS.	15
Figura 14: Flusso della metrologia digitale	18
Figura 15: Classificazione e tecniche di misura delle superfici	20
Figura 16: Microscopio topografico	23
Figura 17: Misurazione come modello di stima dei parametri [6]	28
Figura 18: Illustrazione differenza dei due metodi.....	30
Figura 19: Esempio di procedura di allineamento basata su software: fase iniziale, prima dell'allineamento grezzo [1].	34
Figura 20: Un esempio di estrazione automatica delle caratteristiche della superficie [1].	35
Figura 21: Esempio mappa di deviazione [1].	36
Figura 22: Yaskawa Motoman HC20DTP e le 5 posizioni dell'attuatore finale considerate per la valutazione della riproducibilità [9].	38
Figura 23: Schema gerarchico della riferibilità metrologica. La piramide mostra la progressione dagli standard primari (vertice) ai metodi operativi (base), con l'incertezza di misura che aumenta progressivamente lungo la catena [13]. ...	40
Figura 24: (a) Colocalizzazione e (b) cucitura di due campi visivi [7].	42
Figura 25: Flusso logico applicato.	43
Figura 26: Flow chart dell'implementazione della metodologia di stitching metrologico e freeform.	47
Figura 28: Raffigurazione del dataset creato.	48
Figura 28: Risultati di cucitura basati su machine learning informato dall'incertezza	54
Figura 30: Schema scelta intorno parametro di ricerca overlap (Caso 1).	57
Figura 31: plot con andamento del valore del RMSE all'aumentare delle iterazioni nei 3 stitching delle nuvole di punti.	58
Figura 32:Stitching completo delle 4 nuvole.....	58
Figura 33:Output ICP.....	60
Figura 33: Incisione lastra metallica usata per il secondo caso studio.....	61
Figura 34: Schema scelta intorno parametro di ricerca overlap.	62
Figura 35: Output stitching finale	63
Figura 36: Output ICP dataset "7"	64
Figura 37: Analisi supplementare tramite CloudCompare	65
Figura 38: Schema scelta intorno parametro di ricerca overlap.	67
Figura 40: Output stitching finale con piano inclinato.	68
Figura 41: Output ICP incisione "7" nel caso di piano inclinato	68
Figura 42: Inserto da taglio per tornitura [16].	70
Figura 43: Acquisizione nuvole di punti dell'oggetto freeform in laboratorio.	71
Figura 44: Allineamento prima nuvola di punti- faccia laterale.	72
Figura 45: Allineamento finale- Oggetto freeform completo.....	73
Figura 46: Misure oggetto freeform usando una CMM	73
Figura 47: Piani di riferimento da CloudCompare.....	74
Figura 48: Output CMM	75
Figura 49: Schema concettuale di un gemello digitale per la progettazione di uno strumento e la misurazione delle proprietà dei materiali.	82

Indice delle Tabelle

Tabella 1: Riassunto metodi di stima e di inferenza.	29
Tabella 2: Obiettivi principali dei filtri.....	42
Tabella 3: Descrizione implementazione componenti usati nel codice.....	44
Tabella 4: Media e incertezze di misura ($K=2$) per gli assi di movimento l'incertezza della rotazione valutata come tipo B [9].	53
Tabella 5: Descrizione delle funzioni e dei parametri del codice.....	55
Tabella 6: Valutazioni su media e scarto tipo.	75

Capitolo 1

Introduzione

L'evoluzione tecnologica nei settori industriali avanzati, aerospaziale, automotive, biomedicale ed energia, è caratterizzata da una crescente domanda di prestazioni elevate, efficienza energetica e miniaturizzazione dei sistemi. Già all'inizio del XXI secolo [1], questa spinta innovativa stava rendendo obsoleti i paradigmi progettuali tradizionali basati su geometrie semplici. Si è così favorita l'adozione diffusa di **geometrie complesse e libere (freeform)**, più adatte a soddisfare requisiti funzionali, prestazionali ed estetici sempre più stringenti.

1.1. Contesto e motivazioni

Le superfici freeform, caratterizzate da curvature continue e complesse, prive di simmetrie assiali o traslazionali, rappresentano oggi una delle frontiere più avanzate della progettazione moderna. Grazie a diversi strumenti computazionali d'avanguardia, esse possono essere modellate e ottimizzate per ottenere configurazioni impossibili da realizzare con approcci tradizionali, con ricadute concrete in diversi ambiti tecnologici.

- **Aerospaziale:** La progettazione di fusoliere (Airbus A380, Boeing 787, *Figura 1*) e pale di turbina integrate (Blisk, *Figura 4*) sfrutta le freeform per ridurre peso e resistenza aerodinamica. Infatti, ogni incremento di efficienza si traduce in vantaggi economici ed energetici significativi. La metrologia delle superfici complesse è essenziale sia nei test in galleria del vento, sia nel monitoraggio delle deformazioni durante il ciclo di sviluppo.
- **Ottica:** Le superfici asferiche e freeform consentono di correggere aberrazioni, migliorare la qualità dell'immagine e ridurre il numero di elementi necessari in un sistema ottico. Ciò rende possibile la realizzazione di dispositivi più compatti e sempre più performanti. Esempi storici sono la fotocamera Polaroid SX-70 (1972) e strumenti scientifici di alto livello, come lo spettrometro IRMOS sviluppato dalla NASA.
- **Automotive e Consumer:** Nei settori automobilistico e dei beni di consumo, le superfici complesse vengono impiegate per ottimizzare ergonomia, estetica e prestazioni funzionali. Dalla carrozzeria delle vetture fino agli elettrodomestici, il design con superfici freeform diviene un elemento chiave che coniuga forma e funzione (*Figura 3*).



Figura 1: Modello completo di un A380.



Figura 2: Fotocamera Polaroid SX-70 (1972)



Figura 3: Parte di uno strumento di formatura della lamiera con elementi liberi

Le ampie potenzialità progettuali delle superfici freeform — rese possibili da modelli matematici avanzati e da strumenti computazionali di ottimizzazione — comportano tuttavia una responsabilità tecnica altrettanto rilevante: trasformare una forma ottimale in un componente reale che rispetti i requisiti funzionali previsti. È proprio questo passaggio, dalla definizione teorica della geometria alla sua riproduzione industriale, che pone al centro la questione delle tolleranze geometriche. In altri termini, non basta progettare curvature complesse; è necessario anche stabilire criteri di accettazione, metodi di riferimento e procedure di misura che garantiscano che le deviazioni geometriche ammesse non compromettano le prestazioni attese. Per questo motivo, dopo aver illustrato gli ambiti applicativi e alcuni possibili vantaggi delle superfici freeform, risulta naturale approfondire le modalità di specifica e controllo delle tolleranze, nonché le criticità metrologiche che ne derivano.

1.1.2. Tolleranze delle superfici libere

L'introduzione delle superfici freeform ha reso la gestione delle **tolleranze** un aspetto cruciale e complesso della progettazione moderna: il rapporto tra tolleranza e funzione non è banale e spesso progettisti e produttori operano senza una chiara comprensione del margine di deviazione effettivamente accettabile rispetto alla superficie nominale, il che porta frequentemente a specifiche eccessivamente restrittive, aumento dei costi e difficoltà realizzative.

La definizione delle tolleranze si basa principalmente sul profilo secondo la **ISO 1101**, applicabile con o senza datum: senza datum la tolleranza limita soltanto la deviazione della superficie reale dalla geometria nominale tramite una zona tra due superfici equidistanti (*Figura 4*), mentre con datum la zona di controllo diventa più vincolante, permettendo la verifica simultanea di forma, orientamento e posizione rispetto a riferimenti chiaramente identificati; su superfici canoniche (piani, cilindri, sfere) la scelta del datum è intuitiva, ma sulle freeform risulta spesso problematica.

Accanto alla ISO 1101, norme come la **ISO 1660** (rappresentazione sui disegni) e la **ISO/TR 5460** (principi e metodi tradizionali di verifica) forniscono indicazioni utili, ma senza ancora la presenza di un corpus normativo completo e una prassi industriale consolidata per le superfici freeform, rendendo la definizione e la verifica delle tolleranze un nodo critico per la progettazione e la produzione avanzata.

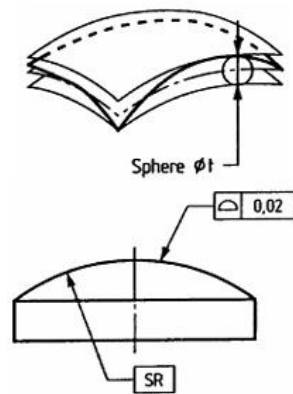


Figura 4: Definizione della tolleranza del profilo non correlata a un riferimento [1].

Come già sottolineato, la rilevanza industriale è evidente: in ottica di precisione le freeform consentono di correggere simultaneamente aberrazioni complesse e di sostituire catene ottiche con singoli elementi customizzati; nelle turbomacchine, ad esempio nei blisk aeronautici (Figura 5), minime deviazioni dalle geometrie ottimali compromettono efficienza e prestazioni; nella bioingegneria e nel design ergonomico la libertà geometrica permette la piena personalizzazione di protesi, impianti e interfacce tattile-sensoriali.

La sfida metrologica centrale, quindi, non è solo misurare una geometria complessa, ma farlo con un'incertezza commisurata al **ruolo funzionale** che quella geometria ricopre. Il controllo di una superficie freeform non si limita alla verifica della "forma" in senso astratto, ma alla garanzia che le sue proprietà fisiche derivate (come il flusso aerodinamico o il percorso ottico di un raggio luminoso) rientrino nelle specifiche di progetto. Questo richiede un approccio alla misurazione che integri strettamente l'acquisizione densa di dati 3D, tipicamente affidata a sistemi ottici senza contatto, con algoritmi di elaborazione e allineamento sofisticati, il cui contributo all'incertezza finale deve essere attentamente valutato e mitigato.



Figura 5: freeform critico [1].

1.2. Caratterizzazione di forme libere

Le superfici freeform presentano sfide metrologiche particolarmente complesse, derivanti dalla loro geometria intrinsecamente libera. A differenza delle superfici canoniche, le freeform non possiedono feature dominanti né assi di riferimento naturali, rendendo difficile individuare un datum stabile e riproducibile. Questa assenza di un riferimento fisso complica l'allineamento dei dati, la registrazione dei punti acquisiti e la validazione metrologica, aumentando il rischio di variazioni significative tra misurazioni dello stesso componente. Anche piccoli errori locali nella misura o nell'allineamento possono propagarsi,

generando disallineamenti globali, compromettendo l'accuratezza complessiva della valutazione dimensionale.

La caratterizzazione metrologica delle superfici freeform, dunque, presenta sfide eterogenee e complesse, la cui entità varia in funzione del settore industriale, della funzione del componente, del materiale e del processo produttivo impiegato. Questi fattori determinano requisiti tecnici fondamentali, quali precisione, risoluzione, sensibilità ai dettagli e accessibilità delle aree complesse. A partire da tali requisiti è possibile elaborare una **classificazione sistematica dei componenti** basata su parametri quali **dimensioni, complessità geometrica, materiale, caratteristiche superficiali e tolleranze richieste**.

Dimensioni

Le dimensioni del componente influenzano in modo diretto la scelta della strategia di misura (*Figura 6*).

- **Scala micro:** dispositivi ottici e biomedicali (pochi millimetri o centimetri) richiedono sistemi con alta risoluzione e precisione sub-micrometrica.
- **Scala media:** componenti meccanici e automobilistici (decine di centimetri fino a 1–2 metri), dove le tolleranze richieste sono tipicamente nell'ordine dei micron o delle decine di micron.
- **Metrologia su larga scala (LSM):** strutture di grandi dimensioni, come fusoliere aeronautiche, scafi navali o stampi industriali di decine di metri, per le quali sono accettabili tolleranze nell'ordine dei millimetri, ma con la necessità di coprire ampi volumi con riferibilità globale.

	Airplane fuselage / wings	Automotive body parts	Turbine blades / blisks	Optical parts	Haptic sensor surfaces
Part dimensions					
large ($10^0 - 10^2$ m)	●		●	●	
medium ($10^{-1} - 10^0$ m)	●	●	●	●	
small ($10^{-3} - 10^{-2}$ m)				●	●
micro (10^{-3} m)					●
Shape complexity					
low	●			●	
medium	●	●	●	●	●
high			●		●
Material, surface					
hard, not sensitive	●	●	●	●	
deformable	●	●			●
specular	●		●	●	
transparent				●	
opaque	●	●	●		●
Relative tolerance					
medium ($10^{-4} - 10^{-3}$)	●	●	●		
fine ($10^{-5} - 10^{-4}$)			●	●	●
ultra fine ($< 10^{-5}$)				●	

Legend:

typical	●
less frequent	●

Figura 6: Classificazione in relazione al settore industriale.

Complessità geometrica

La complessità della forma si distingue in tre principali livelli:

- **Bassa complessità:** superfici quasi piane o asferiche, con la presenza di variazioni di curvatura limitate e facilmente accessibili.

- **Media complessità:** superfici con curvature moderate o elevate, transizioni geometriche articolate o configurazioni multifaccettate che richiedono strategie di acquisizione più sofisticate.
- **Alta complessità:** geometrie con sottosquadri, cavità interne, restrizioni di accesso o caratteristiche non visibili direttamente. In questi casi l'acquisizione dei dati richiede sistemi portatili, bracci articolati o soluzioni robotizzate con traiettorie di misura ottimizzate.

Materiale

Le proprietà del materiale influenzano sia la tecnologia di misura adottabile sia l'accuratezza raggiungibile.

- **Metalli:** generalmente stabili e ben caratterizzabili, ma con possibili problematiche di riflettività elevata.
- **Materiali polimerici:** spesso leggeri e facilmente deformabili, richiedono forze di contatto molto basse o tecniche senza contatto.
- **Materiali trasparenti o semitrasparenti** (vetri, polimeri ottici): solitamente pongono sfide per i sistemi ottici, a causa di rifrazioni e riflessioni multiple che possono introdurre errori significativi.
- **Compositi e materiali additivi:** caratterizzati da anisotropie e rugosità marcata, che complicano la misura e richiedono strategie correttive (rivestimenti temporanei, algoritmi di filtraggio).

Caratteristiche superficiali

La natura della superficie influisce fortemente sull'incertezza di misura.

- **Superfici lisce e riflettenti:** causano errori nei sistemi ottici, risolvibili con trattamenti superficiali (spray opacizzanti, polarizzatori).
- **Superfici ruvide o texturizzate:** possono produrre rumore nei dati acquisiti, richiedendo un filtraggio robusto o l'uso di sensori a contatto.
- **Superfici verniciate o composite:** possono esibire proprietà variabili a seconda dell'angolo di incidenza della luce, imponendo l'impiego di strategie multisensore.

Tolleranze richieste

Le tolleranze vengono spesso valutate come **profilo relativo**, ossia il rapporto tra la tolleranza ammissibile e la dimensione principale del componente. Questo parametro permette di confrontare in modo oggettivo pezzi di scale differenti.

L'applicazione di questi criteri a casi industriali concreti evidenzia uno spettro straordinario di requisiti dimensionali e di precisione. La **Figura 6**

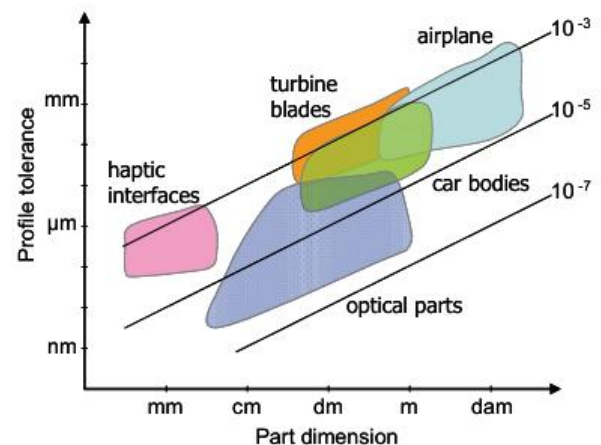


Figura 7: Rappresentazione della complessità geometrica.

sintetizza questi dati, collocando ciascun esempio industriale secondo complessità geometrica, dimensione e tolleranza relativa richiesta. La **Figura 7**, invece, rappresenta graficamente le relazioni tra dimensione assoluta del pezzo e tolleranza di profilo richiesta su un diagramma. Questa rappresentazione consente di evidenziare una tendenza generale: **all'aumentare della scala del componente cresce la tolleranza ammissibile**, ma rimane alta la variabilità tra settori, che richiede strategie metrologiche personalizzate.

1.2.2. Classificazione e requisiti dei sistemi di misurazione

La selezione dello strumento di misura più adatto rappresenta un elemento fondamentale nella pianificazione metrologica, poiché nessuna tecnologia è universale e ogni sistema presenta specifici vantaggi, limiti e ambiti di applicazione.

La **classificazione funzionale dei sistemi di misura** può essere basata su quattro criteri principali: **volume di misura**, **complessità geometrica**, **precisione richiesta** e **proprietà fisiche della superficie**.

- Il **volume di misura** definisce la scala dei componenti analizzabili. Strumenti di microscopia ottica e interferometria sono adatti a componenti miniaturizzati, mentre sistemi di Large-Scale Metrology (LSM), come laser tracker o fotogrammetria industriale, permettono di caratterizzare oggetti metrici o decametrici, come fusoliere aeronautiche, scafi navali o grandi stampi industriali.
- La **complessità geometrica** dei componenti richiede strumenti flessibili. Superfici relativamente semplici possono essere misurate efficacemente con scanner ottici ad alta risoluzione, mentre geometrie complesse – caratterizzate da sottosquadri, cavità interne o accessi limitati – necessitano di bracci portatili, sonde articolate o scanner ottici robotizzati.
- La **precisione richiesta** varia in modo significativo in funzione del settore industriale. Infatti, nelle applicazioni automotive, tolleranze dell'ordine di alcune decine di micron sono spesso sufficienti, mentre in ottica di precisione sono necessarie accuratèzze sub-micrometriche o anche nanometriche.
- Le **proprietà fisiche della superficie** rappresentano un ulteriore fattore critico nella scelta del sistema di misura. Materiali riflettenti, trasparenti o caratterizzati da un'elevata rugosità possono generare errori nei sistemi ottici, rendendo necessarie strategie correttive come la progettazione di rivestimenti antiriflesso, polarizzatori o approcci multisensore.

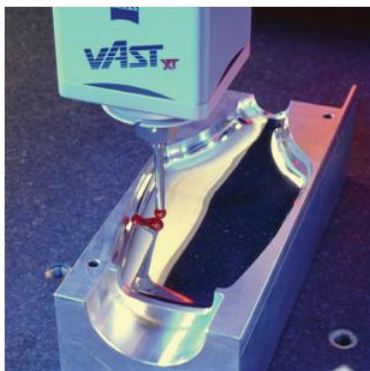


Figura 8: Esempio di una CMM dotata di una sonda di misurazione a contatto mentre scansiona una superficie libera su uno stampo.

Le principali **categorie di sistemi di misura** includono:

- **Macchine di Misura a Coordinate (CMM)**: considerate lo standard di riferimento per accuratezza e riferibilità metrologica secondo la norma **ISO 10360**. Oggi queste macchine sono spesso dotate di **teste multisensore**, che combinano tecnologie tattili e ottiche per aumentare la flessibilità e la produttività. Le CMM si suddividono principalmente in due tipologie: quelle **tattili**, che utilizzano una sonda a contatto per misurare con elevata precisione punti discreti sulla superficie, e quelle **ottiche o laser**, che acquisiscono dati tridimensionali in modo rapido e non invasivo, risultando particolarmente adatte per superfici complesse (*Figura 9*).

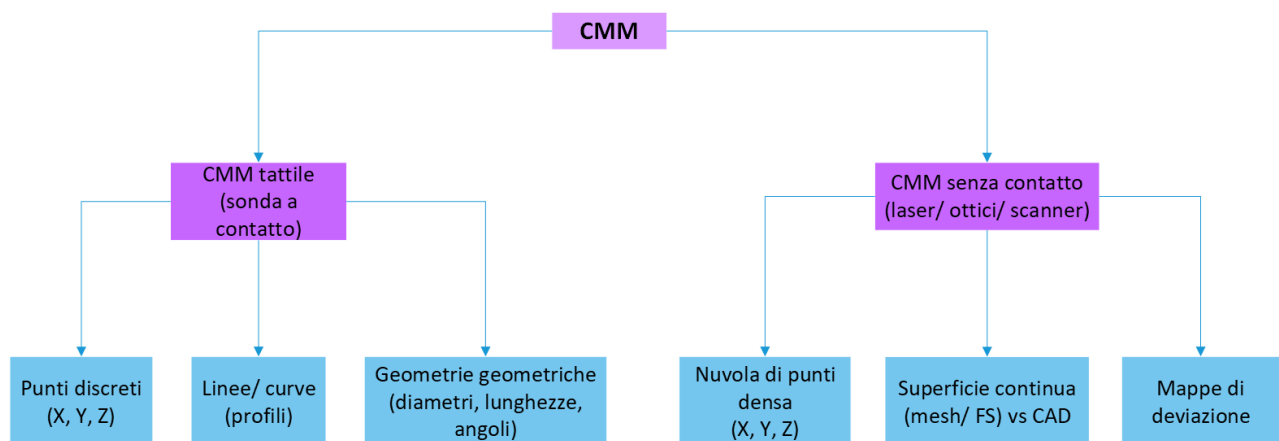


Figura 9: Schema dei principali tipi di acquisizione effettuabili con una CMM.

A seconda della tecnologia e della strategia di misura adottata, le CMM possono generare diversi tipi di risultati. Le misure tattili producono generalmente **punti discreti (X, Y, Z)** o **profili geometrici** costituiti da insiemi ordinati di punti, dai quali si possono derivare **grandezze geometriche** come diametri, angoli o lunghezze. Le misure ottiche, invece, forniscono **nuvole di punti dense** che descrivono in modo dettagliato la forma tridimensionale dell'oggetto. Da queste è possibile ricostruire una **superficie continua (mesh o free surface)**, confrontabile direttamente con il modello CAD teorico. Tale confronto viene spesso rappresentato tramite **mappe di deviazione**, che evidenziano graficamente, di norma con una codifica cromatica, le differenze tra la superficie reale e quella nominale.

La principale limitazione delle CMM, in particolare di quelle tattili, è la **lentezza nell'acquisizione massiva di superfici complesse**. Tuttavia, per garantire un riferimento metrologicamente affidabile, in questo lavoro la CMM è stata utilizzata per generare una **nuvola di punti 3D di riferimento**, rappresentante la superficie reale impiegata nei casi studio analizzati nel Capitolo 4. Le topografie ottenute dall'ottimizzazione sono state successivamente confrontate con queste superfici (*Figura 9*), acquisite tramite CMM. In tale contesto, la macchina ha svolto il ruolo di **"ground truth" metrologica**, ossia la superficie di riferimento contro cui validare i risultati ottenuti con altri sistemi di misura e procedure di elaborazione.

- Scanner ottici a luce strutturata:** proiettano un pattern di luce su una superficie e ne registrano la deformazione tramite una o più telecamere, ricostruendo così la forma tridimensionale per triangolazione (*Figura 10*). Sono strumenti ideali per superfici di dimensioni medio-piccole, perché permettono un'acquisizione rapida e densa di punti senza contatto fisico. Tuttavia, richiedono una calibrazione molto accurata e possono incontrare difficoltà su materiali lucidi, trasparenti o molto scuri, dove la luce viene riflessa o assorbita in modo irregolare. Questi sistemi trovano largo impiego nel reverse engineering, nel controllo qualità e nella digitalizzazione di componenti meccanici o artistici, garantendo precisioni dell'ordine dei pochi decimi di millimetro [2].

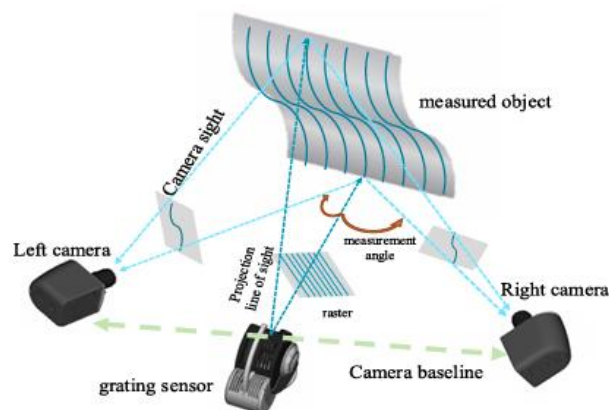


Figura 10: Principio del sistema di misurazione di uno scanner a luce blu [2].

- Interferometri:** rappresentano la tecnica di riferimento quando serve misurare con precisione estrema la figura di una superficie. Si basano sul principio del confronto di due onde luminose, una riflessa dal campione e una di riferimento, da cui si ottiene un pattern di frange che permette di ricostruire differenze di quota anche sub-micrometriche. In ambito ottico si utilizzano spesso i Computer Generated Holograms (CGH), ologrammi progettati appositamente per generare un fronte d'onda di riferimento adatto a superfici complesse come asfere e freeform. La precisione può arrivare a pochi nanometri, ma l'allineamento e la calibrazione del sistema sono critici, così come la sensibilità alle vibrazioni e alle condizioni ambientali. L'interferometria è quindi indispensabile per ottiche di alta precisione e superfici speculari, ma poco adatta a superfici diffuse o non riflettenti.

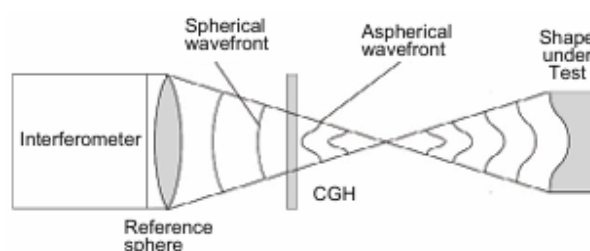


Figura 11: Il principio di base dell'interferometria CGH. [1]

- **Profilometri (meccanici o ottici):** vengono impiegati per misurare la rugosità superficiale o il profilo locale di una superficie. Il profilometro meccanico scorre una puntina a contatto, rilevando le variazioni di altezza, mentre quello ottico utilizza la luce per analizzare la topografia senza contatto. Si tratta di strumenti adatti ad analisi localizzate o lineari, ideali per controllare la finitura e i parametri di rugosità, ma limitati nella ricostruzione tridimensionale completa. La risoluzione verticale è ottima, ma l'area coperta è ridotta e il tempo di misura può essere elevato se si vogliono mappe più estese.
- **Sistemi micro/nano (Atomic Force Microscope (AFM) e l'interferometria a scansione):** sono utilizzati per analizzare superfici miniaturizzate o componenti con tolleranze nanometriche. L'AFM impiega una punta sottilissima che rileva le forze tra sonda e superficie, mentre l'interferometria misura variazioni di quota tramite l'interferenza della luce. Entrambe queste tecniche consentono di ottenere mappe 3D ad altissima risoluzione, ideali per la caratterizzazione di microstrutture, dispositivi MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) e superfici ottiche di precisione. Tuttavia, l'area analizzabile è limitata e i tempi di acquisizione sono più lunghi rispetto ai metodi ottici convenzionali.
- **Sistemi emergenti (tomografia a coerenza ottica (OCT) e metodologie ibride):** offrono nuove possibilità per l'analisi di materiali trasparenti, stratificati o di composizione complessa. Si basano sull'interferometria a bassa coerenza, l'OCT, che consente di esplorare non solo la superficie ma anche la struttura interna dei campioni, fornendo una caratterizzazione tridimensionale non distruttiva. Queste tecniche risultano particolarmente promettenti in ambito industriale e biomedicale, dove è richiesta un'ispezione rapida e precisa di materiali difficili da misurare con i metodi ottici tradizionali.

Dunque, la metrologia delle superfici freeform richiede un **approccio multi-scala e integrato**, che combini allineamento di dati eterogenei e quantificazione rigorosa dell'incertezza lungo l'intera catena di misura. L'uso combinato di strumenti appropriati, strategie di acquisizione mirate e metodologie di elaborazione avanzate, costituisce la base per garantire misure affidabili, ripetibili e riferibili.

1.3. La Sfida della Caratterizzazione di Superfici Freeform

L'adozione industriale su larga scala delle superfici freeform è stata a lungo limitata da sfide metrologiche significative. Diversi studi [1] evidenziavano come i rapidi progressi nella fabbricazione di geometrie complesse – attraverso fresatura a cinque assi, diamond turning o molatura di precisione – fossero frenati dai colli di bottiglia nella fase di controllo qualità. L'avvento della manifattura additiva ha ulteriormente ampliato la libertà geometrica, consentendo di realizzare cavità interne, sottosquadri e strutture intricate che i processi tradizionali non permettevano, aumentando la complessità della verifica metrologica.

La verifica di conformità rispetto al modello nominale richiede oggi una rappresentazione tridimensionale

completa, accurata e riferibile. Le Macchine di Misura a Coordinate (CMM) rappresentano da decenni lo standard industriale per precisione e riferibilità, grazie all'acquisizione di migliaia di punti mediante sonde a contatto o senza contatto. Tuttavia, le CMM, come già accennato, presentano limiti significativi:

- **la lentezza** intrinseca delle misure a tastamento riduce la compatibilità con cicli produttivi rapidi;
- **la definizione di datum stabili** risulta complessa su superfici prive di simmetrie;
- **la geometria** della punta dello stilo filtra dettagli fini, limitando la precisione su micro-caratteristiche.

Per superare questi limiti, si sono diffusi i già citati sistemi ottici senza contatto, come scanner a luce strutturata, profilometri confocali e interferometri, che permettono di acquisire dense nuvole di punti in tempi ridotti senza deformare i campioni. Questi sistemi introducono però nuove sfide, in particolare legate alla **necessità di acquisizioni multi-vista**.

La fusione dei dati provenienti da patch locali mediante algoritmi di stitching diventa spesso la principale fonte di incertezza, superando l'errore strumentale intrinseco. Anche piccoli **errori di posizionamento** o orientamento dello scanner tra le viste si riflettono direttamente nell'allineamento finale, generando discrepanze significative.

L'integrazione dei sensori su piattaforme robotizzate o cobot collaborativi rappresenta un passo avanti importante, poiché garantisce accesso a zone difficili, ripetibilità e flessibilità.

Tuttavia, nasce **un paradosso metrologico: la precisione assoluta del robot è generalmente inferiore a quella del sensore**. Per superare questa contraddizione, è necessario sviluppare metodi di compensazione intelligente, che modellino l'incertezza robotica all'interno del processo di registrazione dei dati, utilizzando framework probabilistici come **modelli bayesiani** o simulazioni Monte Carlo.

La complessità geometrica delle superfici freeform richiede inoltre strategie avanzate di registrazione e fusione dei dati. Gli algoritmi tradizionali, come **l'Iterative Closest Point (ICP)**, permettono di stimare iterativamente le trasformazioni tra nuvole di punti, ma presentano limiti legati alla sensibilità al rumore, alla configurazione iniziale e alla presenza di superfici estese prive di feature distintive. Approcci più recenti si avvalgono di descrittori geometrici, tecniche multi-scala e algoritmi di machine learning per migliorare robustezza e precisione, gestendo dati eterogenei con densità e risoluzioni variabili.

La definizione e quantificazione dell'incertezza rimane una sfida cruciale. Ogni fase della catena metrologica, dall'acquisizione alla fusione dei dati fino al confronto con il modello di riferimento, introduce errori che si sommano. Se per le CMM a contatto esistono norme consolidate (ISO 10360), per sistemi ottici e multi-sensore il quadro normativo è ancora incompleto, spingendo la ricerca verso simulazioni statistiche, tecniche non parametriche e artefatti di riferimento calibrati.

La caratterizzazione di superfici freeform richiede strumenti ad alta risoluzione, strategie multi-vista e multisensore, gestione intelligente dell'incertezza e integrazione digitale. La combinazione di complessità

geometrica, limiti fisici dei sensori e necessità di tempi compatibili con la produzione rende questo campo una delle sfide più avanzate della metrologia moderna.

1.3.2. Il Progetto Europeo DI-VISION e la Riferibilità Metrologica

Per quanto detto finora, è evidente che la crescente complessità delle superfici da misurare, unita alla necessità di tempi di ispezione compatibili con la produzione industriale, richiede lo sviluppo di sistemi di misura automatizzati e affidabili. In questo contesto si colloca il progetto europeo DI-VISION (Digital-Integrated VISION for Advanced Manufacturing), finanziato da Horizon Europe, che si propone di introdurre un nuovo paradigma di Digital Twin Metrology per l'ispezione di componenti freeform.

Obiettivo del progetto è trasformare l'incertezza associata al robot collaborativo (cobot) da semplice fonte di errore a parametro modellato e propagato lungo l'intera catena di misura, integrando le informazioni di posizionamento come vincoli probabilistici nei processi di stitching e registrazione per prevenire convergenze errate negli algoritmi (quali ICP) e preservare la precisione intrinseca dei sensori.

In tale prospettiva, il cobot non rappresenta più un posizionatore approssimato, ma un elemento attivo e tracciabile del sistema di misura. Un aspetto fondamentale di DI-VISION è inoltre il conseguimento della piena **riferibilità metrologica**, intesa secondo il **Vocabolario Internazionale di Metrologia** (VIM) [3] come la proprietà di un risultato di misura correlabile a un riferimento nazionale o internazionale tramite una catena ininterrotta di calibrazioni, ciascuna con la propria incertezza. In contesti automatizzati, tale concetto deve estendersi all'intero processo di acquisizione ed elaborazione, comprendente robot collaborativo, sensori ottici e algoritmi di preelaborazione, registrazione e fusione dati.

In questo scenario si colloca la presente tesi, che ha l'obiettivo di proporre, implementare e validare un framework metodologico innovativo per l'ispezione di superfici freeform, testato su componenti di crescente complessità – da superfici piane fino a **geometrie NURBS** (Non-Uniform Rational B-Splines) – e confrontato con misure certificate, al fine di ridurre il divario tra la flessibilità offerta dai sistemi robotici e le esigenze di elevata precisione e riferibilità metrologica richieste dai moderni processi produttivi.

1.4. Obiettivi della Tesi

Alla luce delle sfide multidisciplinari emerse, questa tesi mira a superare il tradizionale compromesso tra flessibilità e accuratezza proponendo un cambio di paradigma: non più una semplice automazione del processo di misura, ma una piena **integrazione metrologica** all'interno del sistema robotizzato.

L'obiettivo non è soltanto sviluppare un algoritmo di *stitching* più robusto, bensì definire un **framework metrologicamente consapevole**, in cui ogni componente, cobot, sensore ottico e algoritmo di elaborazione, contribuisce attivamente alla stima e alla riduzione dell'incertezza di misura complessiva.

In questa prospettiva, il ruolo del cobot viene profondamente ridefinito: da semplice posizionatore, la cui imprecisione rappresenta un errore da compensare a posteriori, a elemento integrante e caratterizzato della catena di misura. La sua incertezza, nota e quantificata, diventa infatti un vincolo probabilistico da integrare a priori nel processo di elaborazione dei dati.

Il perseguimento di tale obiettivo si articola in tre pilastri concettuali e operativi:

- **Modellazione dell'Incertezza come vincolo attivo:** La caratterizzazione metrologica del cobot non si risolve in una semplice validazione statica. Attraverso una campagna sperimentale sistematica, si costruisce un **modello di incertezza cinematico spazialmente variante**. Questa mappa dell'incertezza non è un dato passivo; diventa il fondamento per vincolare i successivi processi di allineamento, delimitando lo spazio di ricerca dei parametri di rototraslazione a regioni fisicamente plausibili ed evitando le derive (*drift*) tipiche degli algoritmi puramente geometrici come l'ICP.
- **Fusione Ibrida di Dati e Metadati Metrologici:** Il cuore metodologico della tesi risiede in un algoritmo di **registrazione ibrida** che unisce due fonti di informazione eterogenee:
 - **Dati ad alta fedeltà** del sensore ottico (nuvole di punti ad alta risoluzione).
 - **Metadati a bassa fedeltà** ma metrologicamente caratterizzati (le pose nominali del cobot e considerazione della loro relativa incertezza).

Questo approccio ibrido supera i limiti delle tecniche esclusivamente basate sui dati (rumore, aree povere di features) e di quelle esclusivamente cinematiche (accuratezza intrinseca limitata del robot). L'ottimizzazione bayesiana agisce da regolatore intelligente per questa fusione, massimizzando il contributo informativo di ciascuna fonte.

- **Validazione su scala crescente di complessità geometrica e riferibilità:** La validazione del framework è progettata per dimostrare non solo la sua efficacia, ma anche la sua **riferibilità metrologica**. Partendo da dataset sintetici con *ground truth* noto si procede con artefatti reali di complessità geometrica crescente (da superfici planari di riferimento a freeform complesse). Il confronto incrociato con misure certificate fornisce la validazione sperimentale definitiva, collocando i risultati all'interno di una catena di riferibilità riconosciuta a livello internazionale.

Il contributo principale di questa tesi, dunque, è sviluppare una metodologia che permetta l'integrazione di misure ad alto ingrandimento e risoluzione tramite sensori ottici su un braccio robotico, e che consenta la movimentazione in un'ampia area di lavoro. Il risultato atteso rappresenta un avanzamento cruciale verso l'adozione su scala industriale di celle di ispezione robotizzate, economiche e flessibili, abilitanti per i principi dell'Industria 4.0, senza compromettere gli standard qualitativi richiesti dai settori più avanzati.

Capitolo 2

Metrologia delle Superfici Freeform

2.1. Definizione e Applicazioni

Come discusso nel Capitolo 1, l'evoluzione della progettazione e produzione industriale ha portato all'adozione di superfici complesse o freeform, la cui geometria avanzata permette di ottimizzare prestazioni aerodinamiche, ottiche, ergonomiche e funzionali. Tuttavia, questa libertà geometrica comporta nuove sfide metrologiche: la semplice misurazione della forma non è più sufficiente, poiché la precisione richiesta deve essere coerente con la funzione del componente e con le specifiche del processo produttivo. Dal punto di vista della normativa geometrica dei prodotti (GPS)¹, queste superfici rappresentano la classe più generale, caratterizzata dall'assenza di invarianza rispetto alle trasformazioni di rotazione o traslazione. A differenza delle superfici canoniche, non possono essere descritte tramite pochi parametri geometrici. La loro rappresentazione richiede modelli parametrici complessi, tipicamente **NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)**, che rendono possibile la progettazione di geometrie ottimizzate, ma richiedono anche metodologie di misura sofisticate.

2.1.2. Definizione della forma nominale.

La geometria di curve e superfici costituisce il fondamento teorico per la descrizione delle forme complesse. In passato, tali entità venivano rappresentate principalmente attraverso proiezioni ortografiche multiple. Con l'avvento della grafica computerizzata e i rapidi sviluppi della geometria computazionale, la modellazione delle superfici è diventata una componente essenziale dei sistemi di progettazione assistita da computer: attualmente, la geometria nominale di una superficie libera è generalmente definita mediante un modello CAD.

Le superfici libere vengono descritte utilizzando rappresentazioni parametriche, tra cui le più comuni sono le superfici di **Bézier**, le **B-spline** e le **Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)**.

Le equazioni parametriche presentano numerosi vantaggi rispetto a quelle non parametriche: permettono un controllo diretto della forma, hanno una formulazione matematica esprimibile in forma matriciale (che ne agevola l'implementazione tramite routine di calcolo standard), sono indipendenti dal sistema di riferimento e garantiscono efficienza computazionale, aspetto rilevante nei software e nell'hardware di grafica computerizzata, soprattutto per il calcolo di curve e superfici derivate.

Nei sistemi CAD moderni, le NURBS rappresentano lo standard industriale per la descrizione delle geometrie complesse, pur essendo ancora diffuse le superfici B-spline, apprezzate nei software commerciali per la loro formulazione più semplice. Le NURBS costituiscono una generalizzazione delle superfici di Bézier

¹ La normativa geometrica dei prodotti (GPS) definisce standard internazionali per specificare forma, orientamento, posizione e tolleranze dei componenti meccanici, garantendo chiarezza e uniformità tra progettazione e produzione.

e B-spline, e sono ampiamente utilizzate per la rappresentazione delle superfici freeform grazie a proprietà di grande interesse: la possibilità di descrivere ampie porzioni di superficie, la presenza di un controllo locale sulla forma, e la capacità di rappresentare non soltanto geometrie complesse, ma anche superfici analitiche semplici quali piani, sfere, cilindri e coni.

Una superficie NURBS è mostrata in *Figura 12* ed è definita dalla relazione:

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} B_{ui}(u) \cdot B_{vj}(v) \cdot w_{ij} \cdot c_{ij}}{\sum_{i=1}^{n_u} \sum_{j=1}^{n_v} B_{ui}(u) \cdot B_{vj}(v) \cdot w_{ij}}$$

Dove:

- **$p(u, v)$** rappresenta un punto sulla superficie, individuato dai parametri u e v ;
- **n_u e n_v** indicano il numero di punti di controllo rispettivamente nelle direzioni u e v ;
- **$B_{ui}(u)$ e $B_{vj}(v)$** sono le funzioni B-spline normalizzate (o funzioni base) nelle direzioni parametriche u e v . Esse determinano l'influenza che ciascun punto di controllo esercita sulla forma della superficie in una determinata regione del dominio parametrico.
- ciascuna funzione **$B_{ui}(u)$ e $B_{vj}(v)$** è definita dall'ordine **k_u e k_v** (che corrisponde al grado del polinomio più uno) e dalla sequenza di nodi (**t_u e t_v**), ovvero una successione di valori nel dominio parametrico che suddivide l'intervallo in sotto-intervalli. La combinazione tra ordine e nodi influisce sulla forma e sulla continuità della superficie. In particolare, aumentare la molteplicità di un nodo riduce la continuità locale, permettendo di creare spigoli o discontinuità nella superficie.
- **c_{ij}** rappresentano i punti di controllo che determinano la forma della superficie; ovvero i vertici della griglia che definisce la geometria. Essi non giacciono necessariamente sulla superficie stessa, ma ne determinano l'andamento complessivo.
- **w_{ij}** sono i pesi associati ai punti di controllo che modulano l'influenza di ciascun punto sulla superficie. Un peso maggiore fa sì che la superficie si avvicini maggiormente al punto di controllo corrispondente.

Nel caso in cui tutti i pesi w_{ij} siano uguali a 1, una superficie NURBS si riduce a una superficie B-spline.

In questo caso, i pesi non influenzano più la forma e la superficie dipende unicamente dalle funzioni base B-spline e dai punti di controllo.

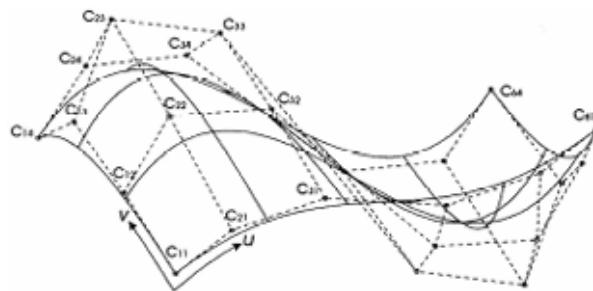


Figura 12: Esempio di rappresentazione NURBS; u e v rappresentano i parametri di posizione di un punto sulla superficie [1].

Nei casi studio presentati nel Capitolo 4 è stato analizzato un esempio concreto di tale superficie: un **inserto da taglio in metallo** (Figura 13) caratterizzato da una **geometria complessa e priva di riferimenti semplici**, assimilabile ad una superficie freeform in ambito metrologico. La presenza di un frangitruciolo integrato, progettato per favorire la rottura e il controllo del truciolo durante la lavorazione, introduce variazioni di curvatura e raccordi locali che rendono la superficie non riconducibile a forme analitiche tradizionali. Per questo motivo, la parte attiva dell'utensile può essere descritta in modo efficace mediante **superfici NURBS**, che consentono di rappresentare fedelmente la complessità geometrica derivante dall'ottimizzazione funzionale della forma, spesso sviluppata attraverso studi di fluidodinamica del truciolo e di interazione utensile-materiale.



Figura 13: Inserto da taglio (caso studio) ed esempio di superficie NURBS.

2.2. Sfide Metrologiche

Le superfici freeform presentano, come già evidenziato nel Capitolo 1, sfide metrologiche particolari, poiché la loro complessità geometrica richiede strategie di misura avanzate per ottenere dati affidabili e coerenti con le prestazioni funzionali previste. La gestione di queste sfide dipende fortemente dalla **scala del componente** (vedi §1.2): superfici di grandi dimensioni e superfici su scala ridotta richiedono strumenti, sistemi di acquisizione e metodologie di elaborazione differenti.

2.2.2. Larga scala

La metrologia di larga scala (Large-Scale Metrology - LSM) affronta la sfida unica di garantire il controllo dimensionale su componenti di grandi dimensioni – come fusoliere aeronautiche, pale di turbine eoliche o scocche automobilistiche – i cui volumi di misura possono estendersi per decine o centinaia di metri. In questi casi, le tecniche metrologiche convenzionali diventano impraticabili, non solo a causa delle dimensioni, ma soprattutto a causa del paradosso fondamentale della LSM: tolleranze sempre più stringenti su dimensioni linearmente crescenti [4].

Le soluzioni tecniche si sono quindi evolute verso sistemi specializzati:

- **Laser Tracker:** si tratta di sistemi di misura ad alta precisione che lavorano in coordinate sferiche, rilevando due angoli (azimut e zenith) e la distanza fino al target. Le versioni più moderne integrano un **Absolute Distance Meter (ADM)**² insieme all'interferometro tradizionale, consentendo di

² **ADM:** dispositivo che misura direttamente la distanza tra il laser tracker e il target senza riferimenti intermedi, permettendo di riacquisire rapidamente il target anche dopo spostamenti, aumentando efficienza e agilità operativa.

riacquisire il target senza riportarlo a un punto di riferimento, migliorando agilità e velocità operativa in ambiente industriale.

Per misurare oggetti complessi o utensili, si possono usare **sonde intelligenti a sei gradi di libertà (6DOF)** che permettono di registrare sia la posizione sia l'orientamento dello strumento, anche in aree difficili da raggiungere. La misura lungo la distanza radiale è estremamente precisa, mentre l'incertezza è più alta nelle direzioni ortogonali alla linea di vista. Per ottenere maggiore accuratezza globale, spesso si utilizzano configurazioni **multilaterate**, con più tracker che misurano lo stesso punto da diverse posizioni, riducendo gli errori angolari.

- **Fotogrammetria Industriale Digitale:** è una tecnica che misura la posizione dei punti sulla superficie di un oggetto usando più foto scattate da angolazioni diverse. Può impiegare più telecamere o **piccoli marker applicati sull'oggetto** come adesivi o sfere riflettenti che fungono da punti di riferimento per calcolare con precisione le coordinate 3D.

Anche se i marker limitano il numero di punti misurabili rispetto agli scanner laser, la tecnica fornisce dati molto accurati per controllare la forma e l'allineamento di componenti grandi o complessi. È particolarmente utile quando è importante montare correttamente le parti tra loro.

La precisione può però essere influenzata dalla luce e dalle caratteristiche della superficie dell'oggetto [5].

- **Laser Scanner (a luce strutturata) e Laser Radar (LiDAR):** sono sistemi che permettono di misurare superfici anche senza marker o punti di riferimento visibili, creando **nuvole di punti molto dense** che descrivono la forma dell'oggetto.

I **laser scanner** a luce strutturata operano a **corto raggio** e si basano sulla **triangolazione**: il dispositivo proietta un pattern luminoso sulla superficie e calcola la distanza dei punti confrontando la posizione osservata da una telecamera. Il **LiDAR (Laser Radar)**, invece, funziona a **lungo raggio** e misura le distanze usando il **tempo di volo (ToF)** del laser o la **modulazione di fase** del segnale riflesso.

Questi strumenti sono veloci e automatizzabili, rendendoli ideali per digitalizzare oggetti grandi o superfici complesse e per il controllo di freeform. Tuttavia, rispetto ai laser tracker, la precisione assoluta è generalmente minore, anche se la densità dei dati e la copertura spaziale sono molto elevate.

La vera complessità della LSM, comunque, non risiede nella scelta dello strumento singolo, ma nella gestione dell'intero processo di misura in un ambiente industriale ostile e non controllato.

La sfida principale è dominare la catena di incertezza estesa, che include:

- **Fusione Multisensore (Data Fusion) [6]:** consiste nell'usare insieme più sistemi di misura diversi per ottenere risultati più precisi e affidabili di quanto potrebbe fare un singolo strumento. Ad esempio,

combinando **laser tracker e fotogrammetria**, è possibile superare i limiti specifici di ciascun sistema e coprire sia grandi volumi sia dettagli complessi.

Esistono due principali modalità di fusione dei dati:

- **Competitiva:** ogni sistema misura l'intera posizione 3D in modo indipendente. I risultati vengono poi combinati statisticamente per ridurre gli errori complessivi.
- **Cooperativa:** i sistemi condividono informazioni parziali, come angoli, distanze o coordinate intermedie, e calcolano insieme una singola posizione finale.

L'approccio cooperativo, pur essendo più complesso da implementare, è più efficiente perché sfrutta tutte le informazioni disponibili e può migliorare significativamente la precisione complessiva delle misure.

- **Modellazione e compensazione delle influenze dominanti:** su componenti grandi, fattori come temperatura e gravità diventano importanti e possono deformare le misure.
 - **Temperatura:** differenze di calore presenti nell'ambiente o generate durante la lavorazione fanno espandere il pezzo in modo non uniforme, modificando la sua forma rispetto a quella prevista.
 - **Gravità:** il peso del componente può piegarlo o deformarlo, e il modo in cui viene sostenuto influisce molto sulla misura, modificando parametri critici e riducendo il margine di tolleranza disponibile.
- **Garantire la riferibilità metrologica:** Per garantire l'**accuratezza delle misure**, non è sufficiente affidarsi a campioni fisici di riferimento, come barre o calibri di circa 1 metro di lunghezza. Questi strumenti risultano infatti inadeguati quando si devono controllare **componenti di grandi dimensioni**, tipici dei settori aeronautico, automobilistico o industriale.

La soluzione consiste nell'impiego di **sistemi di multilaterazione**, in grado di creare un vero e proprio "**metrological frame**" virtuale, ossia un sistema di riferimento metrico portatile e autocalibrante. Tra le tecnologie più utilizzate:

- **Interferometri laser tracking:** strumenti che sfruttano l'interferometria laser per misurare distanze con precisione estrema.
- **Pareti di riferimento calibrate:** superfici o strutture metrologiche note, impiegate come basi di riferimento affidabili.

Grazie a questi sistemi, ogni misura effettuata sul componente viene direttamente **collegata al Sistema Internazionale delle unità (SI)**, garantendo così:

- **Riferibilità completa** agli standard internazionali.
- **Comparabilità** delle misure in luoghi, tempi e condizioni diverse.
- **Affidabilità anche in produzione**, non solo in laboratorio.

In questo modo, la metrologia si svincola dai limiti degli strumenti fisici tradizionali e si evolve in un ecosistema **scalabile, digitale e globale**.

- **Processi di Misura Virtuali (VMP)**: per gestire la complessità delle misure su componenti grandi o complessi, si utilizza l'approccio dei **Virtual Measuring Processes (VMP)**. Un VMP è un modello matematico dinamico che simula come lo strumento di misura interagisce con l'oggetto reale, considerando anche effetti come deformazioni dovute a temperatura o gravità e influenza dell'ambiente circostante. Questo modello permette di stimare in anticipo l'**incertezza** per uno specifico compito e di pianificare la strategia di misura più efficace, decidendo, ad esempio, il miglior posizionamento degli strumenti o il numero ottimale di punti da acquisire.

In pratica, il VMP consente di provare e ottimizzare le misurazioni **virtualmente**, prima di eseguire la misura reale, e rappresenta il fulcro di un approccio **cyber-fisico** alla metrologia, dove simulazione e realtà si integrano per migliorare precisione ed efficienza.

La metrologia sta attraversando una fase di profonda trasformazione.

In passato si faceva affidamento su strumenti singoli, come calibri o laser tracker, che venivano utilizzati in modo indipendente e producevano dati separati. Oggi, invece, si stanno diffondendo sistemi integrati e intelligenti, capaci di combinare diverse tecnologie di misura in un'unica rete coordinata.

Quando questi sistemi vengono collegati ai **Cyber-Physical Production Systems (CPPS)**, le informazioni raccolte in tempo reale non restano isolate, ma vengono immediatamente trasferite e utilizzate per aggiornare i **digital twin**. Esistono due tipi principali di gemelli digitali: quello del componente, che rappresenta una copia virtuale e aggiornata del pezzo fisico, e quello del processo, che riproduce il flusso produttivo e le macchine coinvolte (*Figura 14*).

In questo modo, mentre la produzione è ancora in corso, ogni deviazione o errore viene rilevato subito.

Ciò consente di correggere il processo immediatamente, senza dover attendere la verifica finale, garantendo fin dalla prima realizzazione, la qualità del risultato.

Questa capacità di intervento tempestivo è particolarmente preziosa in settori dove si lavorano componenti molto grandi e complessi, come l'eolico, l'aerospaziale o l'energia. In questi ambiti, infatti, anche un piccolo errore iniziale può generare costi elevati o addirittura compromettere l'intero componente [6].

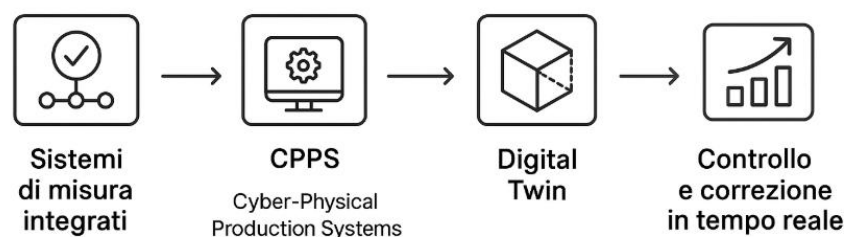


Figura 14: Flusso della metrologia digitale

2.2.3. Piccola scala:

La metrologia su piccola scala, invece, si applica a componenti di dimensioni ridotte o medie, come lenti ottiche, superfici asferiche, microcomponenti biomedicali o parti meccaniche di precisione.

Questa scala è il focus della presente tesi e dei capitoli successivi, perché richiede non solo strumenti ad alta risoluzione, ma anche strategie sofisticate di **fusione dati, registrazione e gestione dell'incertezza**, come discusso nel Capitolo 1 con il paradigma dei cobot metrologicamente consapevoli e il progetto DI-VISION.

Le principali sfide su piccola scala comprendono:

1. **Sistemi ottici ad alta risoluzione:** scanner a luce strutturata, profilometri ottici e interferometri offrono acquisizioni rapide e dense, ma la qualità della misura è condizionata da rumore, distorsioni ottiche e condizioni ambientali. L'incertezza principale deriva spesso dalle operazioni di elaborazione dei dati, come l'allineamento e lo stitching delle nuvole di punti, più che dall'errore strumentale intrinseco [2].
2. **CMM a contatto:** pur garantendo alta precisione e riferibilità metrologica, sono limitate dal tempo di misura, dall'accessibilità a cavità o sottosquadri e dall'effetto della punta dello stilo che può filtrare micro-caratteristiche superficiali.
3. **Elaborazione dati e algoritmi di registrazione:** su piccola scala, anche minimi errori di posizionamento del sensore (tipicamente dell'ordine di decine di micron) possono compromettere la precisione complessiva, soprattutto quando il sensore è montato su un cobot o una piattaforma robotizzata. È quindi necessario integrare la conoscenza dell'incertezza del robot e dei vincoli cinematici nei processi di stitching e registrazione, **trasformando il posizionatore da fonte di errore a parametro modellato**.

2.2.4. Criticità comuni e considerazioni generali

Sia su larga che su piccola scala, le principali difficoltà includono:

- **Quantificazione e gestione dell'incertezza complessiva**, che comprende fonti strumentali, ambientali e di elaborazione;
- **Ripetibilità e riproducibilità** in condizioni operative reali;
- **Adattamento a geometrie complesse** e materiali non cooperativi (riflettenti, trasparenti o rugosi);
- **Integrazione con modelli digitali e processi Industry 4.0**, che permette di garantire riferibilità metrologica e interoperabilità con sistemi automatizzati.

Queste problematiche rendono indispensabile un approccio **multisensore**, che combini acquisizione rapida, alta risoluzione e algoritmi avanzati di fusione e registrazione, come saranno trattati nei paragrafi successivi. In particolare, **la piccola scala** richiede metodologie capaci di integrare dati ad alta fedeltà dei sensori ottici

con metadati a bassa fedeltà ma metrologicamente caratterizzati, consentendo di superare il paradosso metrologico evidenziato nel Capitolo 1: **lo strumento può essere più preciso del sistema che lo posiziona.**

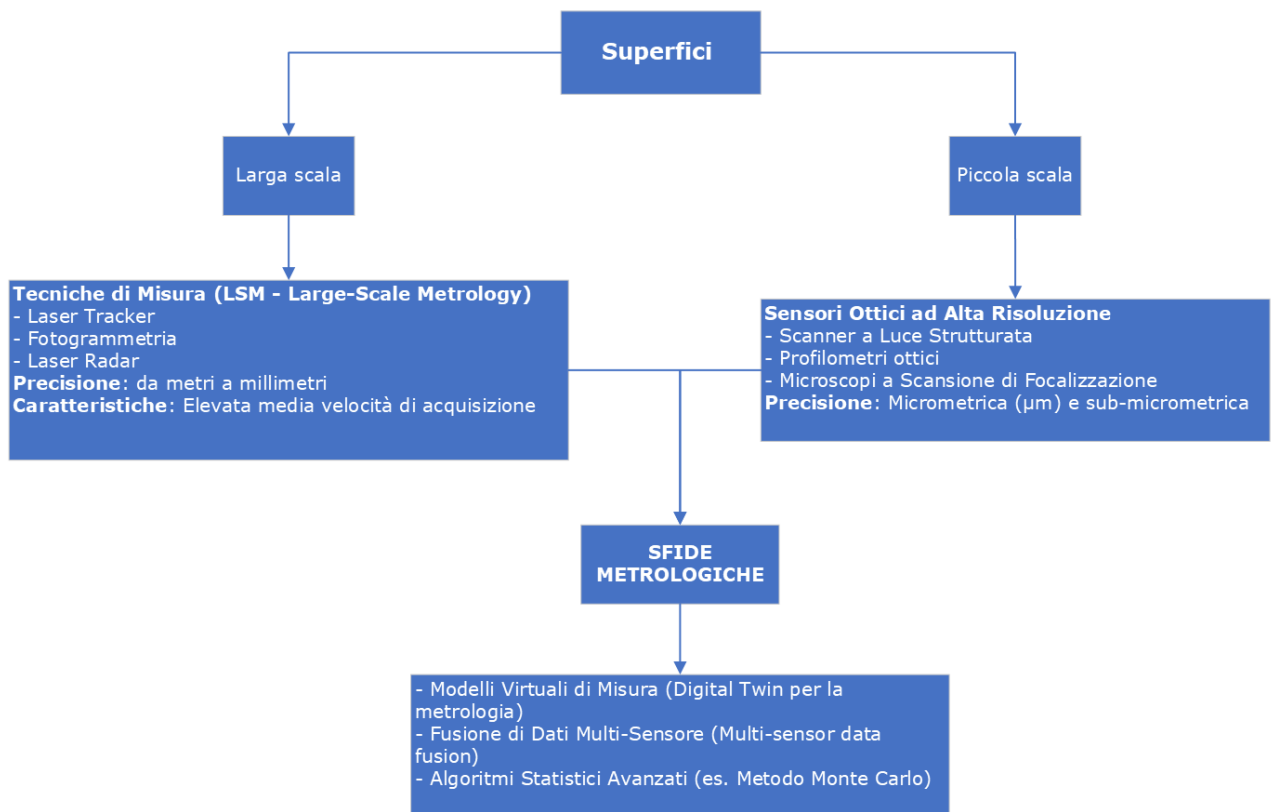


Figura 15: Classificazione e tecniche di misura delle superfici

In questo contesto, il primo passo fondamentale riguarda proprio l’acquisizione dei dati tridimensionali. La qualità, la densità e l’affidabilità dei dataset raccolti costituiscono infatti la base su cui poggiano le successive fasi di registrazione, fusione e analisi metrologica. Per questo motivo, la scelta della tecnologia di misura deve essere coerente con le esigenze applicative e con la scala del fenomeno da considerare.

2.3. Tecniche di Acquisizione 3D piccola scala

La caratterizzazione metrologica di superfici a geometria libera (freeform) a **piccola scala** richiede l’acquisizione di una rappresentazione digitale dettagliata e ad alta precisione della geometria del componente. Questo passaggio è fondamentale per garantire misurazioni affidabili e confronti accurati con il modello nominale. A tale scopo, vengono impiegati principalmente due approcci: **i sistemi a contatto e i sistemi ottici.**

Ciascuna tecnologia presenta vantaggi e limiti specifici in termini di risoluzione, rapidità di acquisizione e impatto sul campione.

Nelle sezioni successive, saranno analizzate nel dettaglio le principali metodologie di acquisizione 3D, illustrandone i principi operativi, le strategie di campionamento e le potenzialità offerte dall'integrazione multisensore.

2.3.2. Strategie di misurazione e campionamento

L'ispezione di superfici a geometria libera richiede una distribuzione appropriata dei punti di misura, in grado di rappresentare accuratamente le caratteristiche della superficie senza introdurre errori significativi. La definizione di un campionamento "uniforme" è un problema complesso, in quanto la densità di punti ottimale dipende non solo dalle dimensioni della superficie, ma anche dalla sua curvatura locale e dalle caratteristiche geometriche del pezzo.

Nei sistemi ottici, la possibilità di acquisire rapidamente un elevato numero di punti consente di ottenere nuvole di punti dense, sufficienti per una rappresentazione dettagliata della forma dell'oggetto. Al contrario, nei sistemi a contatto, la velocità di acquisizione più limitata impone l'adozione di strategie di campionamento più mirate, volte a ottimizzare la copertura della superficie riducendo al minimo il numero di punti necessari.

Tra le principali strategie di campionamento si distinguono:

- **Campionamento uniforme:** suddivide la superficie in una griglia regolare, semplice da implementare ma poco sensibile alle variazioni di curvatura.
- **Campionamento basato sulla curvatura:** rileva una densità di punti maggiore nelle aree ad alta curvatura e minore nelle zone relativamente piate, in modo da garantire una rappresentazione accurata delle regioni geometricamente critiche.
- **Densità minima dei campioni:** definisce una distanza massima tra punti vicini, per assicurare una copertura minima anche nelle zone piate.
- **Campionamento parametrico:** stabilisce la posizione e il numero di punti da acquisire in modo più strutturato attraverso l'utilizzo della parametrizzazione della superficie.

Oltre ai criteri di campionamento statici, esistono strategie **adattive**, che permettono di incrementare progressivamente la densità di punti nelle aree in cui l'errore stimato risulta maggiore, garantendo una copertura completa senza interventi manuali complessi. Queste metodologie sono particolarmente utili per la misurazione di geometrie complesse o anatomiche, dove aree occluse o dettagli sottili possono non essere correttamente acquisite in una scansione iniziale.

Analogamente, la **pianificazione del percorso della sonda** nei sistemi a contatto contribuisce a ottimizzare tempi di acquisizione e sicurezza, evitando collisioni e massimizzando l'efficienza del rilevamento. Algoritmi dedicati permettono di individuare percorsi ottimali, selezionare punti critici da misurare e coordinare la sequenza di sondaggio in modo automatico.

Questa combinazione di strategie, adattive e non, costituisce la base per un'acquisizione 3D efficace e affidabile, che può essere ulteriormente potenziata dall'integrazione di dati provenienti da sistemi multisensore, come verrà illustrato nelle sezioni successive.

2.3.3. Sistemi a Contatto

I sistemi a contatto costituiscono una delle principali tecnologie per l'acquisizione di superfici tridimensionali. Si basano sull'interazione fisica tra una **sonda** (o stilo) e la superficie dell'oggetto da misurare. Il principio generale consiste nello scorrimento della punta sulla superficie e nella registrazione dei suoi spostamenti verticali da parte di trasduttori, permettendo di ricostruire il profilo del componente con elevata precisione. Questi strumenti possono raggiungere **risoluzioni verticali fino all'ordine del nanometro**, sebbene il campo di misura rimanga limitato a pochi millimetri [1].

Tra i principali sistemi a contatto si distinguono:

1. **Profilometro a Stilo (Profilometro meccanico):** si serve di una punta sferica in materiali duri, come diamante o carburo di tungsteno, che scorre sulla superficie. Misura con grande precisione il profilo superficiale ed è particolarmente efficace per ottenere elevata accuratezza verticale. Un esempio è il **rugosimetro**, specializzato nella misurazione della rugosità superficiale, registra variazioni microscopiche della superficie per calcolare parametri come **Ra, Rz e Rq**. È fondamentale per garantire che le superfici rispettino le specifiche progettuali.
 - **Ra (scostamento aritmetico medio):** rappresenta la media aritmetica dei valori assoluti delle deviazioni del profilo rispetto alla linea media. È l'indice più comune e fornisce un valore medio generale della rugosità.
 - **Rz (altezza media massima del profilo):** misura la distanza media tra il picco più alto e la valle più profonda su più tratti del profilo. Evidenzia maggiormente difetti o irregolarità marcate.
 - **Rq (scostamento quadratico medio):** simile a Ra, ma calcolato come radice quadrata della media dei quadrati delle deviazioni. Risulta più sensibile ai picchi e alle valli estremi, dando un'indicazione più accurata delle irregolarità superficiali.
2. **Profilometro a Tastatore / CMM (Coordinate Measuring Machine):** integra la sonda in un braccio articolato che può muoversi su tre dimensioni. La sonda acquisisce dati dimensionali di componenti complessi e può essere automatizzata per misurazioni in linea di produzione. I principali vantaggi dei sistemi a contatto includono l'**alta accuratezza metrologica**, la **riferibilità delle misure** garantita da procedure di taratura standardizzate e l'indipendenza dalle proprietà ottiche del materiale (colore, trasparenza, riflettività).

Tuttavia, queste tecnologie presentano anche alcune limitazioni, soprattutto nel caso di superfici freeform o complesse:

- **Velocità di misura ridotta:** l'acquisizione avviene punto per punto o profilo per profilo, più lenta rispetto alle tecniche ottiche.
- **Forza di contatto:** la pressione esercitata, seppur minima, può deformare o danneggiare materiali delicati.
- **Effetto della geometria della punta:** il raggio della sfera limita la rilevazione di spigoli vivi o microcavità, causando "smussature" dei profili.
- **Necessità di pianificazione accurata:** per garantire copertura completa della superficie ed evitare collisioni con geometrie complesse.

Nonostante tali limitazioni, i sistemi a contatto mantengono un ruolo centrale nella metrologia industriale. Essi rappresentano infatti lo **standard di riferimento** per la taratura e la validazione di strumenti più moderni, e risultano ancora insostituibili in tutte le applicazioni in cui l'accuratezza verticale è prioritaria rispetto alla rapidità di acquisizione.

2.3.4. Sistemi ottici

I sistemi ottici rappresentano una soluzione avanzata e **non invasiva** per la metrologia delle superfici freeform, offrendo un'alternativa ad alta velocità rispetto alle tecniche di misura a contatto.

Grazie alla loro capacità di acquisire dense nuvole di punti in modo rapido e accurato, questi sistemi hanno rivoluzionato il campo della caratterizzazione superficiale, consentendo di analizzare geometrie complesse senza rischi di danneggiamento o alterazione del campione.

Strumenti ottici senza contatto che permettono di acquisire mappe tridimensionali di superfici, anche di dimensioni molto ridotte, come inserti da taglio, con elevata risoluzione verticale e laterale sono i microscopi topografici (*Figura 16*). Questi strumenti possono operare secondo differenti principi di misura, tra cui la microscopia a luce focale variabile e l'interferometria a coerenza spaziale (Coherence Scanning Interferometry, CSI). Alcune piattaforme commerciali integrano più principi ottici nello stesso sistema, consentendo di selezionare la tecnologia più adatta in funzione della superficie da analizzare.

Grazie alla possibilità di ottenere misure ad alta precisione su aree localizzate e su geometrie complesse — come curvature, raccordi e microstrutture — i microscopi topografici rappresentano uno strumento fondamentale per la caratterizzazione non invasiva delle superfici.



Figura 16: Microscopio topografico

Nel presente lavoro, il microscopio mostrato in *Figura 16* è stato utilizzato come strumento di riferimento per acquisire misure da confrontare con i risultati dello stitching delle diverse nuvole di punti generate dall'algoritmo sviluppato, al fine di validarne l'accuratezza (Capitolo 4).

Due tecniche particolarmente rilevanti sono i microscopi a variazione di fuoco (**Focus-Variation Microscopes**) e l'interferometria a scansione di coerenza (**Coherence Scanning Interferometry - CSI**), entrambe basate su principi fisici distinti ma complementari per l'estrazione di informazioni topografiche dettagliate [7] [8].

- **Microscopi a Variazione di Fuoco (Focus-Variation Microscopes)³**: Questi strumenti combinano le proprietà di un microscopio ottico con una scansione verticale ad alta precisione per misurare topografie superficiali. Il principio di funzionamento si basa sulla variazione della messa a fuoco: acquisendo **una sequenza di immagini a diversi piani focali**, l'algoritmo individua per ogni punto della superficie il livello di massimo contrasto o nitidezza, ricostruendo così con precisione la geometria tridimensionale della topografia. I microscopi a variazione di fuoco permettono di ottenere **elevata risoluzione laterale e verticale**, fino a pochi nanometri. Il campo di vista è limitato, rendendoli pertanto più adatti a misurazioni su **piccola scala di aree localizzate** [9].
- **L'interferometria a scansione di coerenza (CSI)** [10], nota anche come interferometria a luce bianca, sfrutta invece il fenomeno dell'interferenza per misurare la topografia con precisione nanometrica. In questa tecnica, la luce di una sorgente a banda larga viene divisa in un braccio di riferimento e un braccio di misura che illumina la superficie del campione. L'interferenza costruttiva si verifica solo in un ristretto intervallo di altezze vicino alla posizione di zero differenza di percorso ottico (ZPD). Scansionando verticalmente il campione, è possibile individuare per ogni punto il picco di intensità interferometrica, ricostruendo così una mappa tridimensionale delle altezze. La CSI è particolarmente efficace su superfici lucide o ad alta finitura ottica, come specchi o rivestimenti ceramici lucidati, dove altre tecniche possono presentare limitazioni, distinguendosi per l'elevata risoluzione verticale e la capacità di caratterizzare dettagli superficiali estremamente fini [5].

Le metodologie ottiche descritte costituiscono strumenti versatili e avanzati per la metrologia di precisione, ciascuna caratterizzata da specifici punti di forza che ne ampliano le possibilità applicative. Grazie alla capacità di acquisire mappe tridimensionali ad alta risoluzione senza contatto diretto con il campione, questi sistemi consentono di analizzare geometrie complesse e superfici delicate senza rischi di danneggiamento o alterazione. In particolare, i microscopi a variazione di fuoco e l'interferometria a scansione di coerenza si sono dimostrati strumenti particolarmente efficaci per la misurazione dei parametri superficiali **Sa, Sq e Sz**, che rappresentano grandezze tridimensionali. Questi parametri, essenziali per una

³ Topografie acquisite nei casi studio (Cap. 4) mediante microscopio a variazione di fuoco montato su un braccio robotico collaborativo (cobot), garantendo movimenti controllati e precisione nella scansione.

descrizione accurata della topografia reale delle superfici, sono stati calcolati e analizzati anche per uno studio dettagliato delle caratteristiche superficiali, fornendo informazioni preziose per il controllo qualità e lo sviluppo di componenti freeform in diversi settori industriali. L'elevata risoluzione verticale, la precisione laterale e la capacità di acquisire superfici complesse rendono questi sistemi ottici strumenti imprescindibili per una caratterizzazione completa delle superfici su scala micro e sub-micrometrica.

2.3.5. Integrazione su Sistemi Robotizzati

La limitazione intrinseca dei sistemi ottici è il compromesso tra risoluzione e campo di vista (**FOV**). Per caratterizzare un intero componente freeform di dimensioni anche modeste, è necessario acquisire decine o centinaia di misure parziali (FOV) da diverse angolazioni. L'integrazione di sensori ottici di alta precisione su **piattaforme robotizzate**, in particolare **cobot (robot collaborativi)**, rappresenta la soluzione più promettente per automatizzare questo processo di acquisizione multi-vista. I cobot offrono flessibilità di movimento, accesso ad aree difficili (sottosquadri) e la possibilità di essere riprogrammati rapidamente per lotti di produzione diversi. L'integrazione genera di fatto dei Coordinate Measuring Systems (CMS), recentemente standardizzati nella **ISO 10360-13**. Tuttavia, questa integrazione introduce una criticità metrologica fondamentale: la precisione di posizionamento assoluta di un cobot industriale (tipicamente $\pm 100 \mu\text{m}$) è di **ordini di grandezza inferiore** alla precisione di misura del sensore ottico montato (nell'ordine del μm). Pertanto, i dati di posa forniti dal controller del robot non possono essere utilizzati direttamente per allineare le diverse acquisizioni senza introdurre errori inaccettabili.

L'integrazione di sensori ottici ad alta precisione su piattaforme robotizzate apre nuove possibilità per l'acquisizione automatizzata e multi-vista di superfici complesse. Tuttavia, la limitata precisione di posizionamento dei cobot rende necessaria l'adozione di strategie di registrazione robuste per garantire il corretto allineamento delle nuvole di punti acquisite. Questo problema, apparentemente confinato alla sola gestione del posizionamento robotico, si inserisce in un contesto più ampio: la necessità di integrare e correlare dataset eterogenei provenienti da diverse tecnologie di misura. Tale esigenza conduce naturalmente al tema della **fusione di dati multisensore (MSDF)** [6].

2.4. Fusione di dati multisensore

Nella caratterizzazione avanzata di materiali e componenti, raramente una singola tecnologia di misura è sufficiente a descrivere tutte le proprietà di interesse, rendendo fondamentale la fusione di dati multisensore (**Multi-Sensor Data Fusion, MSDF**).

Questa metodologia permette di integrare informazioni provenienti da strumenti diversi — come misure topografiche, dati chimici o proprietà meccaniche — in un unico quadro coerente, aumentando

significativamente la capacità descrittiva rispetto all'uso di un singolo sensore. L'obiettivo principale della MSDF non è solo combinare dataset eterogenei, ma correlare spazialmente proprietà fisiche differenti, consentendo di associare, per esempio, la morfologia superficiale di un materiale alla sua composizione chimica e alle prestazioni meccaniche locali, fornendo così una base solida per progettazione e ottimizzazione di componenti complessi.

Il processo di fusione si articola principalmente in due fasi: la **pre-localizzazione** e **registrazione dei dati**, che prevede l'identificazione di landmark comuni e la determinazione di matrici di trasformazione spaziale (rotazioni, traslazioni e scala) per minimizzare l'errore tra punti corrispondenti; **l'integrazione** e **analisi** correlativa, che consente di interrogare i dataset uniti e di ricavarne diverse informazioni.

Le applicazioni della MSDF sono molteplici e comprendono:

- la caratterizzazione di materiali compositi e rivestimenti;
- il controllo qualità nell'additive manufacturing, correlando porosità e rugosità superficiale con la resistenza meccanica locale;
- il *reverse engineering* avanzato, che combina misure tattili e dati ottici per ricostruire modelli CAD più completi e accurati.

La sfida principale consiste non solo nell'allineamento accurato dei dataset, ma anche nella gestione e propagazione delle incertezze, considerando gli errori dei sensori, quelli introdotti dagli algoritmi di registrazione e dalle interpolazioni, per garantire riferibilità metrologica e affidabilità dei risultati.

Dal punto di vista operativo, la fusione multisensore richiede diverse **operazioni principali**:

- **Pre-elaborazione dei dati**, per ridurre il rumore;
- **Registrazione**, l'allineamento dei dati in un sistema di coordinate comune;
- **Ottimizzazione**, per migliorare la qualità della fusione, utilizzando conoscenze a priori;
- **Fusione dei dati**, l'integrazione vera e propria delle informazioni;
- **Riduzione dei dati** (opzionale), per semplificare o comprimere i dataset;
- **Generazione di mesh** (opzionale), per creare superfici a partire dalle nuvole di punti;
- **Conversione del formato dei dati** (opzionale), per garantire compatibilità con altri sistemi o software.

La fusione può avvenire a differenti livelli di astrazione — **segnale, caratteristiche o simbolico**.

- A livello di **segnale**, si combinano i dati grezzi provenienti dai sensori, con l'obiettivo di ridurre il rumore o aumentare la risoluzione.
- A livello di **caratteristiche**, i dati vengono prima elaborati per estrarne feature significative (es. rugosità, spettri chimici) che vengono poi correlate tra loro, riducendo la complessità informativa.

- A livello **simbolico**, ogni sensore fornisce già una propria interpretazione o decisione (es. difetto rilevato/non rilevato), e la fusione integra queste decisioni per aumentare l'affidabilità complessiva.

Inoltre, i sensori coinvolti possono essere **omogenei**, quando misurano la stessa grandezza fisica, oppure **eterogenei**, quando rilevano proprietà differenti. In quest'ultimo caso è spesso necessario un pre-processing, come estrazione di caratteristiche o compressione dei dati, per rendere le informazioni confrontabili e integrabili.

Le configurazioni dei sensori possono essere **complementari**, **competitive** o **cooperative**, fornendo informazioni indipendenti, ridondanti o complementari.

Infine, la fusione multisensore può essere ulteriormente classificata in base all'aspetto su cui viene realizzata: tra sensori, tra attributi, tra domini o nel tempo. Questo approccio permette di massimizzare le informazioni disponibili, aumentare l'accuratezza e la copertura spaziale, ridurre il rumore e ottenere valutazioni più complete e affidabili [6].

2.4.2. Metodi di fusione dei dati

La fusione dei dati multisensore consiste nel decidere quali misure integrare nel dataset finale e come combinare eventuali dati ridondanti.

In presenza di ridondanza, è necessario considerare **criteri di qualità**, come l'incertezza di misura, utilizzando approcci di **stima e di inferenza** [6].

2.4.3. Metodi di stima

La stima dei parametri si basa sulle informazioni fornite dai sensori, da dati aggiuntivi o su conoscenze a priori. Ogni singola misurazione può essere interpretata come un tentativo di determinare il valore reale di una grandezza fisica Y , accompagnato da un'incertezza, poiché il valore vero è ideale e non direttamente osservabile. Il processo di misura produce **osservazioni** q_k che contengono informazioni sia sulla grandezza da stimare sia sul sistema di misura stesso. Per ottenere una stima di Y , si assume una relazione tra la grandezza reale e le osservazioni acquisite, utilizzando queste ultime per calcolare il miglior valore possibile. Tuttavia, **perturbazioni sistematiche** X_i e imperfezioni dello strumento rendono impossibile determinare Y in modo univoco.

Per migliorare la stima, è possibile combinare più osservazioni e informazioni aggiuntive. Si può partire da una stima iniziale basata su una singola misura e conoscenze limitate, integrando successivamente ulteriori osservazioni per ridurre l'incertezza attraverso metodi statistici. Inoltre, l'inclusione di informazioni a priori sul processo di misura e sulle influenze esterne, come spostamenti meccanici o rumore del sensore, consente di ottenere una stima più precisa e affidabile della grandezza reale.

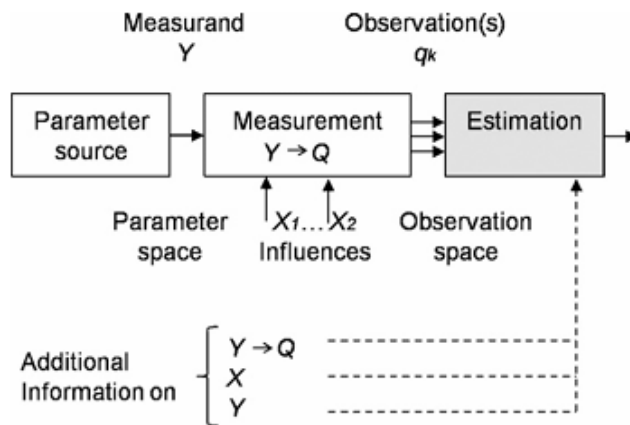


Figura 17: Misurazione come modello di stima dei parametri [6]

In quell'esperimento sono state acquisite nuvole di punti della superficie di un campione mediante un **microscopio a variazione di fuoco** montato su un braccio robotico. In questo contesto, Y rappresenta la geometria reale della superficie, le osservazioni q_k corrispondono alle nuvole di punti acquisite dal microscopio, e gli errori X_i includono spostamenti meccanici, rumore del sensore e altre perturbazioni. L'allineamento e la fusione delle nuvole equivalgono a una stima ottimale di Y , combinando le informazioni disponibili da più misurazioni.

Ogni nuvola costituisce una misura indipendente, contenente informazioni sulla topografia reale ma anche errori dovuti a rumore, vibrazioni o variazioni del fuoco. L'algoritmo utilizzato per allineare e unire queste nuvole rappresenta un esempio pratico di metodo di stima: mira a ottenere la migliore approssimazione possibile della superficie reale, riducendo le discrepanze tra punti corrispondenti e correggendo eventuali spostamenti o rotazioni tra le misurazioni. In termini teorici, la superficie reale può essere interpretata come la grandezza fisica ideale Y , mentre le nuvole di punti costituiscono osservazioni q_k affette da errori X_i .

Questo caso studio dimostra come i principi della stima multisensore possano essere applicati per integrare diverse misurazioni, ottenendo una rappresentazione coerente e più affidabile della geometria di un campione.

2.4.4. Metodi di inferenza

La stima di una grandezza fisica reale, come la geometria di una superficie, può essere affrontata utilizzando **metodi probabilistici basati su inferenza bayesiana**. In questo approccio, ogni misura rappresenta un'osservazione parziale della grandezza reale e contiene sia informazioni utili sia errori dovuti a rumore o imperfezioni strumentali. L'inferenza bayesiana consente di combinare queste osservazioni con conoscenze a priori, aggiornando iterativamente la stima dei parametri, riducendo l'incertezza complessiva

In pratica, ogni misurazione fornisce un'informazione parziale sulla geometria reale, ma è soggetta a errori.

Combinando questi dati con algoritmi appropriati, è possibile ottenere la miglior approssimazione possibile della superficie reale, correggendo discrepanze e allineando le misurazioni tra loro.

Un esempio concreto di applicazione di questi principi è fornito dal caso studio descritto nel Capitolo 4. In

e ottenendo una valutazione più accurata della grandezza reale. La fusione di più misure permette di correggere discrepanze e propagare le informazioni lungo tutto il sistema multisensore, fornendo una stima coerente e affidabile.

Nei casi studio analizzati, sono state acquisite diverse nuvole di punti della superficie di un campione. Ogni nuvola rappresenta una misura indipendente, contenente errori dovuti a rumore, vibrazioni o imprecisioni del sensore. L'allineamento tra le nuvole è stato realizzato mediante **ottimizzazione bayesiana**, minimizzando il RMSE lungo la direzione di movimento per stimare i parametri di rotazione e traslazione. Successivamente, le nuvole allineate sono state fuse ottenendo una mappa tridimensionale coerente e ottimale della superficie. Questo processo applica concretamente i principi dell'inferenza bayesiana e della fusione multisensore, integrando dati multipli e migliorando l'affidabilità della stima della geometria reale.

Funzione	Stima	Inferenza
Input	Misure multiple (omogenee o eterogenee)	Misure multiple + conoscenze a priori
Output	Valore unico ottimale per ogni grandezza	Distribuzione probabilistica con incertezze
Scopo nella fusione	Ridurre rumore, combinare ridondanze	Integrare informazioni diverse e quantificare incertezza
Applicazione tipica	Dati numerici, segnali fisici	Valutazioni complesse, decisioni basate su più sensori

Tabella 1: Riassunto metodi di stima e di inferenza.

Nei casi presi in esame, il codice applica principalmente un **metodo di inferenza bayesiana** per stimare i parametri di trasformazione tra le nuvole di punti, combinando le misure con le conoscenze a priori sulle posizioni nominali del robot. La **stima classica** appare solo come risultato finale, cioè i parametri ottimali di rotazione e traslazione, ma questi derivano dal processo bayesiano che integra tutte le osservazioni.

Il metodo, dunque, implementa concretamente l'inferenza bayesiana nel contesto della **fusione multisensore**, ottenendo una mappa tridimensionale coerente e affidabile della superficie, in cui la stima classica emerge come prodotto finale del processo probabilistico (Tabella 1).

2.5. Algoritmi di Registrazione e Stitching

La base del processo di integrazione dei singoli campi visivi (Field of View, FOV) in un unico modello superficiale completo risiede negli algoritmi di **registrazione e stitching**. Questa fase è fondamentale, in quanto anche piccoli errori di posizionamento del cobot, sebbene ridotti dalla calibrazione, tendono ad accumularsi durante l'acquisizione, generando disallineamenti e distorsioni nel modello finale. Quindi, la scelta e l'implementazione della strategia di registrazione determinano, in modo diretto, l'accuratezza metrologica del risultato finale.

Gli algoritmi di registrazione possono essere classificati in due principali categorie (Figura 18):

- **Metodi feature-based:** si basano sull'identificazione e sul matching di punti caratteristici della superficie, come spigoli, picchi o avvallamenti.
- **Metodi point-set-based:** operano direttamente sull'intera nuvola di punti, cercando di minimizzare le distanze tra le superfici sovrapposte.

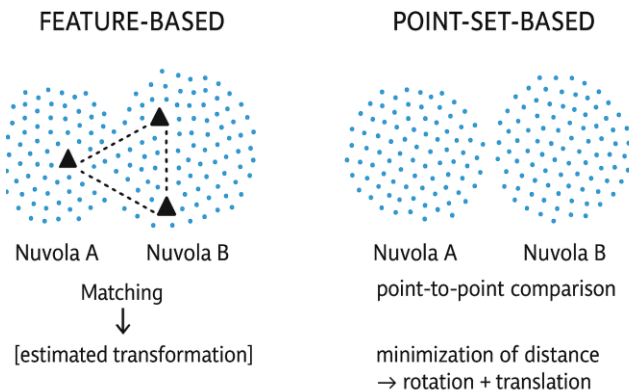


Figura 18. Illustrazione differenza dei due metodi.

Tra i metodi point-set-based, l'**Iterative Closest Point (ICP)** rappresenta l'approccio più diffuso, offrendo un framework solido ed efficiente per il fine allineamento di nuvole di punti. La comprensione dei suoi fondamenti, dei vantaggi e dei limiti è essenziale per motivare la sua integrazione con tecniche di ottimizzazione avanzata, come i metodi bayesiani proposti in questo lavoro.

In molti casi, un singolo posizionamento del pezzo o del sistema di misura non consente di acquisire l'intera superficie di interesse, a causa di limitazioni intrinseche della tecnologia impiegata o di vincoli pratici ed economici. Ad esempio, sistemi di proiezione a frange o scanner laser possono avere capacità di posizionamento e orientamento limitate. Quando una singola configurazione non è sufficiente, si effettuano più misurazioni con il pezzo orientato in diverse posizioni rispetto al sistema di misura. Lo **stitching**, dunque, si basa sul **posizionamento relativo dei sensori rispetto al pezzo da misurare**, informazione che viene acquisita in fase di calibrazione. Durante la **registrazione grezza**, tale conoscenza viene utilizzata per trasferire ogni acquisizione locale nel sistema di coordinate globale, generando così un set di dati complessivo del pezzo digitalizzato.

L'allineamento relativo dei dati acquisiti in diverse viste è definito **registrazione**. La registrazione di viste multiple si basa sulla sovrapposizione delle informazioni misurate e può essere affrontata tramite approcci hardware o software:

- **Soluzioni hardware:** si basano sull'impiego di dispositivi fisici in grado di garantire un allineamento accurato già in fase di acquisizione. Tra questi rientrano sistemi multisensore calibrati, piattaforme rotanti con controllo preciso dell'angolo di rotazione o bracci meccanici dotati di sensori di posizione. Questi strumenti consentono di conoscere esattamente la posizione e l'orientamento del sensore per ogni vista, e di ridurre o eliminare la necessità di ulteriori elaborazioni software.

L'elevata precisione, però, è bilanciata da **costi e complessità più alti**, che ne limitano l'uso a contesti **industriali e metrologici**, dove è richiesta la massima accuratezza.

- **Soluzioni software:** operano sui dati acquisiti e mirano a sovrapporre le diverse viste dopo la scansione. Possono sfruttare la presenza di oggetti di riferimento (come sfere, marker o target) visibili in tutte le acquisizioni, che fungono da punti comuni per calcolare la trasformazione tra le viste, oppure procedere senza riferimenti fisici, utilizzando solo le geometrie delle superfici. In quest'ultimo caso, la registrazione si basa su algoritmi di ottimizzazione come l'ICP (Iterative Closest Point) e le sue varianti, che ricercano la trasformazione rigida (rotazione e traslazione) che minimizza la distanza tra le nuvole di punti sovrapposte.

Dopo aver descritto i principali approcci hardware e software per la registrazione delle nuvole di punti, nelle analisi presentate nel Capitolo 4 si è adottato un **approccio ibrido**, in cui un **cobot equipaggiato con un microscopio a variazione di fuoco** fornisce le posizioni relative delle viste (fase hardware), successivamente **raffinate tramite algoritmi software di allineamento e ottimizzazione bayesiana** per garantire un allineamento ad alta precisione della topografia.

2.5.2. ICP: spiegazione fondamenti matematici, vantaggi e limiti.

L'allineamento spaziale dei dataset rappresenta una fase cruciale sia nella fusione di dati multisensore sia nella ricostruzione multi-vista tramite sistemi robotizzati. Tra le metodologie più consolidate per la registrazione di nuvole di punti emerge l'**Iterative Closest Point (ICP)**, sviluppato originariamente da Besl e McKay (1992).

L'ICP è un algoritmo iterativo che mira a minimizzare la distanza tra punti corrispondenti di due set di dati tridimensionali, determinando la trasformazione rigida (rototraslazione) che allinea una nuvola di punti di riferimento a una nuvola, detta target. La procedura prevede tre passaggi principali:

- **Identificazione** dei punti corrispondenti tra le due nuvole;
- **Calcolo** della trasformazione rigida ottimale che riduce la distanza quadratica media tra i punti corrispondenti;
- **Applicazione della trasformazione** e iterazione fino a convergenza secondo un criterio prestabilito (ad esempio variazione minima dell'errore quadratico o numero massimo di iterazioni).

Nonostante la sua semplicità e diffusione, l'ICP presenta alcune limitazioni intrinseche:

- **Sensibilità alla posizione iniziale:** l'algoritmo ICP richiede che le due nuvole di punti da allineare siano già approssimativamente sovrapposte prima dell'inizio della procedura iterativa. Se la posizione iniziale è troppo disallineata, con rotazioni o traslazioni elevate, il criterio di minimizzazione della distanza tra punti corrispondenti può condurre la soluzione verso un minimo locale, cioè una configurazione che può sembrare corretta a livello numerico ma che non

corrisponde al reale allineamento geometrico. In questi casi, l'algoritmo converge rapidamente ma verso un risultato errato, producendo una registrazione imprecisa o incoerente. Per questo motivo, è spesso necessario fornire una stima iniziale accurata della trasformazione (ad esempio tramite dati del sensore, del cobot o marker di riferimento).

- **Dipendenza dalla densità e distribuzione dei punti:** la qualità dell'allineamento ottenuto mediante ICP dipende fortemente dalla **densità dei punti** e dalla **distribuzione spaziale** delle nuvole. Se le nuvole sono poco dense, irregolari o presentano ampie zone prive di dati, l'algoritmo può incontrare difficoltà trovare corrispondenze significative tra i punti, aumentando l'incertezza sulla trasformazione stimata. Inoltre, superfici **ripetitive o simmetriche** (ad esempio pattern regolari, texture periodiche o aree piane) possono generare **corrispondenze ambigue**, poiché più punti della seconda nuvola possono risultare equidistanti da un punto della prima, causando errori di allineamento locale. In questi casi, è utile integrare l'ICP con strategie di selezione o filtraggio dei punti più informativi.
- **Gestione dei dataset eterogenei:** l'algoritmo ICP classico presuppone che le due nuvole di punti da registrare siano omogenee, cioè, acquisite dallo stesso tipo di sensore e con caratteristiche geometriche comparabili (stessa scala, risoluzione e accuratezza). Nella pratica, però, molte applicazioni richiedono la **fusione di dati provenienti da sensori diversi** (scanner laser, fotogrammetria o microscopi ottici) che possono differire per densità, precisione, campo visivo o livello di rumore. Queste differenze rendono difficile l'individuazione di corrispondenze, e possono compromettere la convergenza dell'algoritmo. In questi casi è necessario introdurre varianti dell'ICP (ad esempio pesate, robuste o basate su feature) o strategie di normalizzazione dei dataset per rendere i dati più compatibili prima della registrazione.

Per affrontare le sfide legate alla fusione di nuvole di punti provenienti da acquisizioni multiple, l'INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) ha sviluppato approcci innovativi, tra cui il software open-source **SurfFILE (Surface Interface for LEarning)**, un pacchetto Python progettato per l'analisi topografica delle superfici. SurfFILE offre una suite modulare di algoritmi e procedure espandibili e personalizzabili, specificamente orientati alla caratterizzazione di superfici a scala micrometrica e nanometrica, utilizzando dati provenienti da profilometri tattili, microscopi a variazione di fuoco e altri strumenti ottici.

Grazie alla capacità di gestire dataset eterogenei e di eseguire analisi comparative tra diverse strategie di fusione, SurfFILE fornisce un quadro concettuale completo per valutare precisione, robustezza e coerenza delle misurazioni. Inoltre, questa piattaforma consente l'implementazione di tecniche avanzate di ottimizzazione, che permettono di affinare i parametri di fusione, riducendo l'incertezza e migliorando la qualità e l'affidabilità del modello 3D finale [11], [12].

Tra i principali **vantaggi**, SurfFILE offre flessibilità e possibilità di personalizzare gli algoritmi in base alle esigenze, supporta il **batch processing** per l'elaborazione efficiente di grandi quantità di dati e garantisce

riferibilità e accuratezza metrologica. La modularità del pacchetto permette inoltre di adattare facilmente le procedure a diversi tipi di analisi topografica e di confrontare strategie di acquisizione.

Per superare le limitazioni dei metodi di allineamento tradizionali come l'ICP e per integrare approcci alternativi più robusti, SurfLE può essere combinato con algoritmi dedicati di registrazione e ottimizzazione, costituendo così una pipeline completa per la generazione di modelli 3D affidabili.

2.5.3. Metodi di Ottimizzazione

L'accuratezza e la robustezza degli algoritmi di registrazione e stitching possono essere migliorate significativamente attraverso l'impiego di **metodi di ottimizzazione avanzata**. Tali metodi non sostituiscono gli algoritmi di base, come l'ICP, ma ne potenziano l'efficacia, permettendo di gestire le incertezze intrinseche, i dati eterogenei e le configurazioni iniziali complesse.

Tra le principali strategie di ottimizzazione si distinguono:

1. **Ottimizzazione deterministica:** si basa sulla definizione di una funzione di costo, come l'errore quadratico medio (RMSE) tra nuvole di punti, che viene minimizzata iterativamente. Nel caso dell'ICP, ciò corrisponde al continuo accoppiamento dei punti più vicini e alla stima della trasformazione ottimale. Questo approccio garantisce risultati rapidi quando la configurazione iniziale è vicina alla soluzione corretta ed è efficiente dal punto di vista computazionale per dataset di medie dimensioni, ma può rimanere intrappolato in minimi locali ed è sensibile a rumore, outlier e corrispondenze ambigue.
2. **Ottimizzazione probabilistica e bayesiana:** modella l'allineamento come un problema probabilistico, trattando la trasformazione tra nuvole di punti come una distribuzione di probabilità. È possibile definire vincoli a priori sulle trasformazioni ammissibili e aggiornare la stima dell'allineamento attraverso filtri bayesiani. Questo approccio risulta più robusto rispetto a rumore e discontinuità nei dati, consente la riferibilità metrologica e gestisce incertezze e outlier in maniera naturale, sebbene richieda modelli probabilistici adeguati e comporti maggiore complessità computazionale.
3. **Approcci ibridi:** combinano le tecniche deterministiche e probabilistiche, spesso integrando ICP con algoritmi basati su feature locali come angoli, bordi o punti di interesse, per migliorare le corrispondenze iniziali. In questo modo si sfruttano la velocità e la semplicità dell'ICP, la robustezza delle feature locali e la capacità dei modelli probabilistici di gestire incertezze, ottenendo risultati più stabili anche in scenari complessi o con dataset parziali. Tuttavia, richiedono una progettazione accurata per bilanciare i diversi componenti e comportano un carico computazionale maggiore rispetto ai singoli approcci.

L'impiego di questi metodi di ottimizzazione costituisce un passaggio concettuale essenziale per garantire che le diverse acquisizioni, provenienti da sensori ottici o da piattaforme robotizzate (vedi §2.4.1.), possano essere integrate in un **modello unico coerente**, preservando la qualità metrologica.

In particolare, essi rappresentano il collegamento metodologico tra la fase teorica di fusione multisensore (§2.4) e l'implementazione pratica dei processi di stitching, senza entrare ancora nei dettagli sperimentali e nelle scelte specifiche che saranno discusse nel Capitolo 3.

2.6. Allineamento dei dati misurati alla geometria nominale

La procedura di allineamento consiste nel determinare la corrispondenza tra il sistema di coordinate del dispositivo di misura e il sistema di coordinate nominale del pezzo, considerando il tipo di tolleranza da verificare.

Nel caso di tolleranze di profilo riferite a piani di riferimento con geometria semplice, l'allineamento è relativamente diretto e simile alla verifica delle tolleranze standard. I riferimenti geometrici vengono acquisiti seguendo strategie di misura appropriate, e la trasformazione delle coordinate per l'allineamento può essere eseguita mediante semplici operazioni software. In alcune applicazioni, l'allineamento di un pezzo a forma libera può essere già garantito nella fase di misurazione, posizionando il componente in una configurazione desiderata mediante strumenti speciali, mascherine o dispositivi fisici dedicati. Questi strumenti, pur diffusi nell'industria, richiedono produzioni di precisione e possono comportare costi elevati, legati alla realizzazione di superfici di accoppiamento e riferimenti specifici.

Quando non sono disponibili piani di riferimento semplici, la procedura di allineamento si basa esclusivamente sulla geometria libera del pezzo. In questo caso, è necessario ricorrere a procedure software che permettano di allineare matematicamente i dati acquisiti al modello nominale.

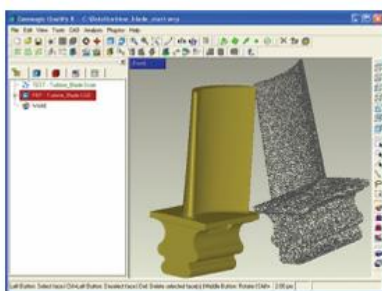


Figura 19: Esempio di procedura di allineamento basata su software: fase iniziale, prima dell'allineamento grezzo [1].

Generalmente, il processo prevede due passaggi principali: **allineamento grezzo** e **allineamento fine**.

2.6.2. Allineamento grezzo

L'allineamento grezzo fornisce una stima iniziale sufficientemente accurata per rendere praticabili le procedure di misura computerizzate e per facilitare l'algoritmo di *allineamento fine*. Questo step può essere eseguito tramite dispositivi di mascheratura con un certo grado di ripetibilità o mediante operazioni software

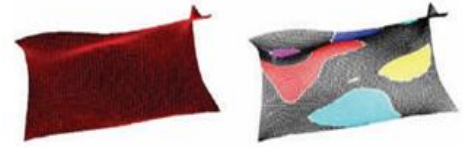
assistite da un operatore, a seconda del principio di misura e del software utilizzato.

La Figura 19 mostra un esempio di nuvola di punti acquisita tramite un sistema ottico e allineata inizialmente al modello CAD. La letteratura fornisce diverse procedure per l'allineamento grezzo sia per

tecnologie a contatto sia senza contatto. Nella maggior parte dei casi, l'allineamento iniziale è iterativo e spesso sfrutta l'algoritmo ICP.

Un approccio alternativo prevede l'uso di **metodi basati su caratteristiche**, in cui i dati misurati e il modello nominale vengono analizzati per estrarre automaticamente le caratteristiche superficiali. In base alla curvatura, i punti vengono classificati in categorie di forma: concava, convessa, a sella o piatta. I gruppi di punti con la stessa classificazione costituiscono le caratteristiche superficiali, che vengono poi confrontate tra dati misurati e modello nominale per calcolare una trasformazione iniziale di allineamento (Figura 20).

Figura 20: Un esempio di estrazione automatica delle caratteristiche della superficie [1].



2.6.3. Allineamento fine

Successivamente all'allineamento grezzo, si applicano algoritmi matematici più sofisticati per ottenere *l'allineamento fine*. Il modello nominale può essere rappresentato come un insieme di punti o, preferibilmente, come un modello di superficie. Il confronto diretto tra punti misurati e superficie nominale garantisce una maggiore accuratezza rispetto all'utilizzo di soli punti nominali.

Il metodo dei **minimi quadrati** è comunemente impiegato, minimizzando la somma dei quadrati delle deviazioni tra punti misurati e superficie nominale. La valutazione delle tolleranze secondo il **metodo della zona minima** risulta più coerente con le specifiche metrologiche standard.

Per applicazioni specifiche, possono essere adottati metodi alternativi:

- **Minimi quadrati ponderati:** estendono la classica minimizzazione dell'errore quadratico medio introducendo pesi differenti per i punti della nuvola. In questo modo, punti più critici o con maggiore affidabilità possono influenzare maggiormente la stima della trasformazione, mentre punti meno importanti o più incerti hanno un peso ridotto. Questo approccio è utile quando alcuni punti devono avere **priorità superiore** nel processo di registrazione.
- **Massimizzazione della minima deviazione positiva:** pensata per componenti industriali in cui è fondamentale garantire che il materiale non venga rimosso in eccesso o che la lavorazione non comprometta il pezzo. In questo caso, l'ottimizzazione non si limita a ridurre l'errore medio, ma mira a massimizzare il margine minimo positivo tra la superficie reale e quella target, assicurando che nessuna parte del componente risulti più piccola del minimo consentito dal progetto.
- **Calibri virtuali:** strumenti software che consentono di allineare punti o regioni strategiche sulla base di criteri applicativi specifici. Simili a strumenti fisici utilizzati in metrologia, i calibri virtuali permettono di posizionare, orientare e verificare componenti digitali secondo regole definite, semplificando la validazione o la preparazione alla lavorazione. Questi strumenti sono

particolarmente utili in settori in cui **alcune geometrie o feature richiedono attenzione particolare**, come nell'assemblaggio meccanico o nella stampa 3D di precisione.

2.6.4. Valutazione dei risultati e parametri applicativi

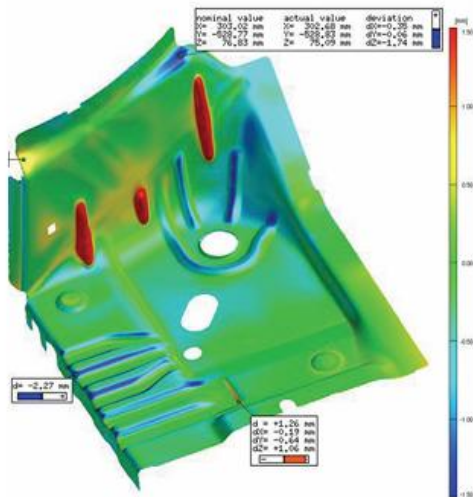


Figura 21: Esempio mappa di deviazione [1].

I risultati dell'allineamento e della misura vengono generalmente rappresentati tramite **mappe 3D a colori delle deviazioni** rispetto al modello nominale (Figura 21). Queste mappe consentono di visualizzare immediatamente le discrepanze tra il componente reale e il progetto digitale, evidenziando aree che superano le tolleranze definite. Oltre alla semplice rappresentazione grafica, le mappe forniscono informazioni statistiche quantitative, come il numero e la percentuale di punti fuori tolleranza, le deviazioni medie e la distribuzione delle frequenze degli scostamenti.

In applicazioni in cui la comprensione della geometria è critica, può risultare utile integrare le mappe con sezioni trasversali che confrontano direttamente il profilo nominale, la zona di tolleranza e il profilo reale lungo piani selezionati. Questo approccio facilita l'identificazione di errori locali e consente un'analisi più dettagliata dei punti critici del componente. Per superfici particolarmente complesse, oltre alle deviazioni lineari, possono essere definiti parametri di valutazione avanzati, come **le curvature principali e la curvatura gaussiana**, che descrivono la forma locale della superficie. Questi parametri sono particolarmente utili per rilevare difetti localizzati, come deformazioni, ondulazioni o concentrazioni di stress, che potrebbero non emergere dalle sole misure di distanza dal modello nominale. L'uso combinato di mappe delle deviazioni e analisi delle curvature permette quindi una valutazione completa e precisa della qualità geometrica del componente.

Capitolo 3

Metodologia

Il Capitolo 2 si è concluso con un'analisi approfondita degli algoritmi di registrazione e stitching, evidenziando in particolare i limiti intrinseci dell'algoritmo ICP classico – soprattutto in termini di convergenza verso minimi locali e assenza di una modellazione esplicita dell'incertezza – e proponendo l'ottimizzazione bayesiana come approccio alternativo e più robusto per affrontare il problema dell'allineamento di campi di vista (FOV) in contesti metrologicamente critici. Sono stati discussi i fondamenti teorici, i vantaggi in termini di esplorazione efficiente dello spazio dei parametri e la capacità di incorporare vincoli probabilistici derivanti dalla calibrazione del sistema di movimento.

Alla luce di queste considerazioni algoritmiche, **il presente capitolo descrive nel dettaglio la metodologia sviluppata per implementare e validare una pipeline di stitching metrologicamente consapevole**, passando dalla teoria alla pratica operativa. Si parte dalla descrizione della **piattaforma sperimentale Mind4Lab**, che costituisce l'hardware di riferimento, per abilitare misure automatizzate su geometrie complesse. Segue una trattazione approfondita della **metodologia di calibrazione del cobot**, fase prerequisito fondamentale per quantificare l'incertezza di posizionamento e fornire valori per i bound di ricerca probabilistici necessari all'algoritmo di ottimizzazione. Viene quindi presentata la **strategia di acquisizione**, con le logiche alla base della pianificazione dei FOV, bilanciando efficienza e affidabilità metrologica.

La descrizione dell'**algoritmo di stitching sviluppato**, di cui viene delineato il flusso operativo completo, rappresenta il cuore del capitolo. L'implementazione combina un'ottimizzazione bayesiana, i cui parametri di ricerca sono vincolati dall'incertezza di posizionamento e una successiva verifica tramite ICP.

Per validare la bontà dell'approccio prima dell'applicazione su dati reali, l'algoritmo viene testato e caratterizzato su **dati sintetici**, permettendo un'analisi controllata delle performance e una quantificazione dell'incertezza introdotta dalla procedura di stitching in uno scenario ideale e perfettamente conoscibile. Questo capitolo fornisce dunque le basi metodologiche e strumentali che abilitano la successiva validazione sperimentale su componenti reali, oggetto del Capitolo 4.

3.1. La Piattaforma Sperimentale Mind4Lab

La piattaforma sperimentale utilizzata per lo sviluppo e la validazione della metodologia proposta è basata sull'integrazione di un cobot **Yaskawa Motoman HC20DTP** e di uno strumento ottico per la misura della topografia superficiale **Alicona InfiniteFocus Sensor R25** (Figura 22). Il cobot, con un payload massimo di 20 kg, è dotato di encoder ai giunti con una **ripetibilità nominale** dichiarata di **50 μm** . Lo strumento Alicona, basato sulla tecnologia di variazione di fuoco, è caratterizzato da un **rumore di misura di 10 nm**. Nella configurazione adottata, è stato montato un obiettivo a lunga distanza **10x**, che fornisce un campo di vista (FOV) di **2x2 mm** e una risoluzione spaziale (dimensione del pixel) di **0.977x0.977 $\mu\text{m}/\text{pixel}$** .

Il sensore è stato fissato saldamente all'end-effector del cobot, il quale, muovendosi nello spazio, permette di posizionarlo con sei gradi di libertà per misurare aree estese e superfici libere complesse, inclusi sottosquadri e zone altrimenti inaccessibili ai sistemi di misura tradizionali da banco.

Questa integrazione fisica costituisce la base hardware per implementare procedure di ispezione automatizzate, progettate e validate per garantire misure affidabili e ripetibili secondo criteri metrologici, costituendo l'oggetto principale dello studio.

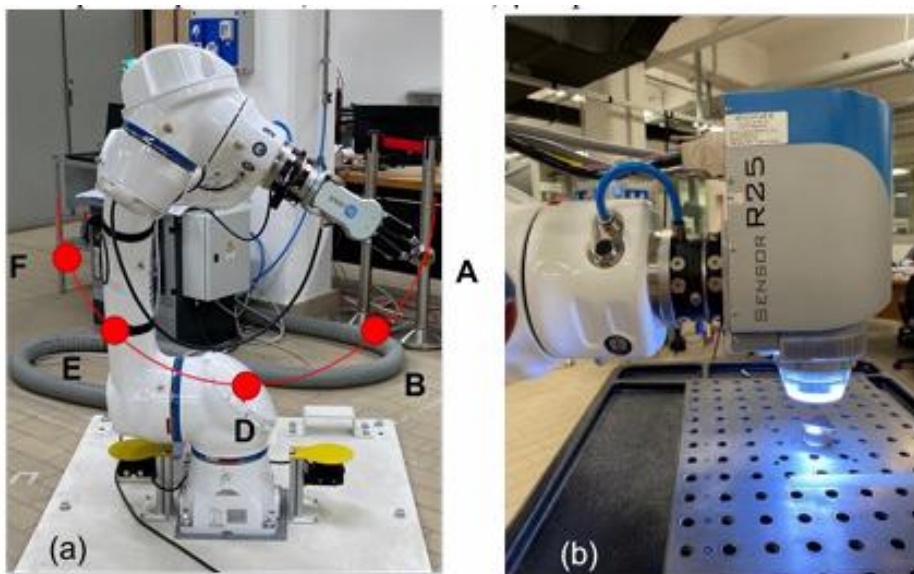


Figura 22: Yaskawa Motoman HC20DTP e le 5 posizioni dell'attuatore finale considerate per la valutazione della riproducibilità [9].

3.2. Metodologia di Calibrazione del Cobot

L'integrazione di un sensore di metrologia di superficie su un cobot introduce una fondamentale dipendenza tra l'accuratezza della misura finale e la precisione intrinseca del braccio robotico. A differenza di una macchina di misura a coordinate (CMM), descritta nel Capitolo 2, le cui caratteristiche metrologiche sono garantite e certificate dal costruttore, un **cobot** è progettato primariamente per la manipolazione e l'assistenza, non per la metrologia di precisione.

La sua ripetibilità e accuratezza di posizionamento sono quindi ordini di grandezza inferiori rispetto agli standard richiesti per la misura di micro-geometrie superficiali.

Pertanto, una **calibrazione preliminare e una caratterizzazione metrologica completa degli assi del cobot** sono prerequisiti indispensabili per:

1. **Quantificare l'incertezza** associata al posizionamento del sensore.
2. **Vincolare probabilisticamente** gli algoritmi di stitching, limitando il **dominio di ricerca dei parametri** di rototraslazione a un intorno fiduciario del movimento nominale, definito proprio dall'incertezza di posizionamento misurata.
3. **Stabilire la riferibilità metrologica** dell'intero processo di misura, collegando l'errore di misura superficiale agli standard primari attraverso la catena di calibrazione del laser tracker.

L'errore superficiale residuo (RMSE) viene corretto e quantificato entro i limiti di incertezza, i quali sono a loro volta determinati e documentati lungo la catena di calibrazione del laser tracker, il cui riferimento ultimo è lo standard primario del metro, nel Sistema Internazionale (SI). L'RMSE rappresenta quindi una misura diretta e riferibile dell'accuratezza della giunzione superficiale.

La metodologia adottata, sviluppata sul cobot Yaskawa Motoman-HC20DTP e applicabile a qualunque manipolatore industriale, ha l'obiettivo di valutarne il comportamento metrologico in termini di accuratezza, ripetibilità, riproducibilità ed errore di inversione, secondo i criteri previsti dalla norma **ISO 9283**. Tale analisi costituisce la base per l'impiego del robot in applicazioni di misura e posizionamento ad elevata precisione. L'incertezza di posizionamento è stata determinata utilizzando un sistema di misura esterno primario basato su **laser tracker** [9]. Si sottolinea che in questa sede non viene utilizzata alcuna procedura di taratura degli assi del robot: l'analisi si limita a riportare i risultati della caratterizzazione come dato di partenza sperimentale per le attività successive.

I risultati di accuratezza, ripetibilità, errore di inversione, definiscono le prestazioni posizionali del cobot nel contesto applicativo considerato e costituiscono un prerequisito fondamentale per la successiva fase di ottimizzazione dell'allineamento e dello stitching di superfici topografiche acquisite.

3.2.2. Controllo metrologico e analisi dell'incertezza

Una volta definita la procedura di calibrazione del cobot, è necessario collocare tale processo all'interno di un contesto metrologico, che ne garantisca l'affidabilità e la riferibilità ai campioni primari.

La calibrazione del sistema robotico rappresenta infatti un passaggio cruciale della catena metrologica, ovvero la sequenza di riferimenti che collega le misurazioni operative — i dati raccolti dal cobot durante l'attività reale — agli standard internazionali (unità SI).

Come illustrato in *Figura 23*, la catena metrologica è composta da diversi livelli, ciascuno caratterizzato da un diverso grado di accuratezza: dagli standard internazionali e dai metodi definitivi, ai calibratori di riferimento e agli strumenti commerciali, fino ai metodi di routine, dove si colloca il cobot calibrato.

L'incertezza di misura cresce progressivamente lungo la catena, ma la riferibilità è assicurata dal collegamento documentato tra i livelli e dalla stima dichiarata dell'incertezza (bias e imprecisione).

In questa prospettiva, il cobot calibrato assume il ruolo di sistema di misura operativo, in cui i protocolli sviluppati costituiscono il metodo di misura e gli strumenti di riferimento, come il laser tracker, fungono da calibratori.

L'incertezza totale del sistema deriva dalla combinazione dei contributi legati agli strumenti di riferimento, al processo di calibrazione e alle condizioni operative. La riferibilità metrologica è garantita dalla documentazione della catena di calibrazione, dalla certificazione degli strumenti e dalla valutazione dell'incertezza secondo le linee guida GUM.

Questo approccio consente di trasformare il cobot da solo dispositivo di automazione a strumento di misura affidabile, integrato nella gerarchia metrologica e utilizzabile come base per algoritmi intelligenti di ottimizzazione e miglioramento della precisione delle misurazioni [13].

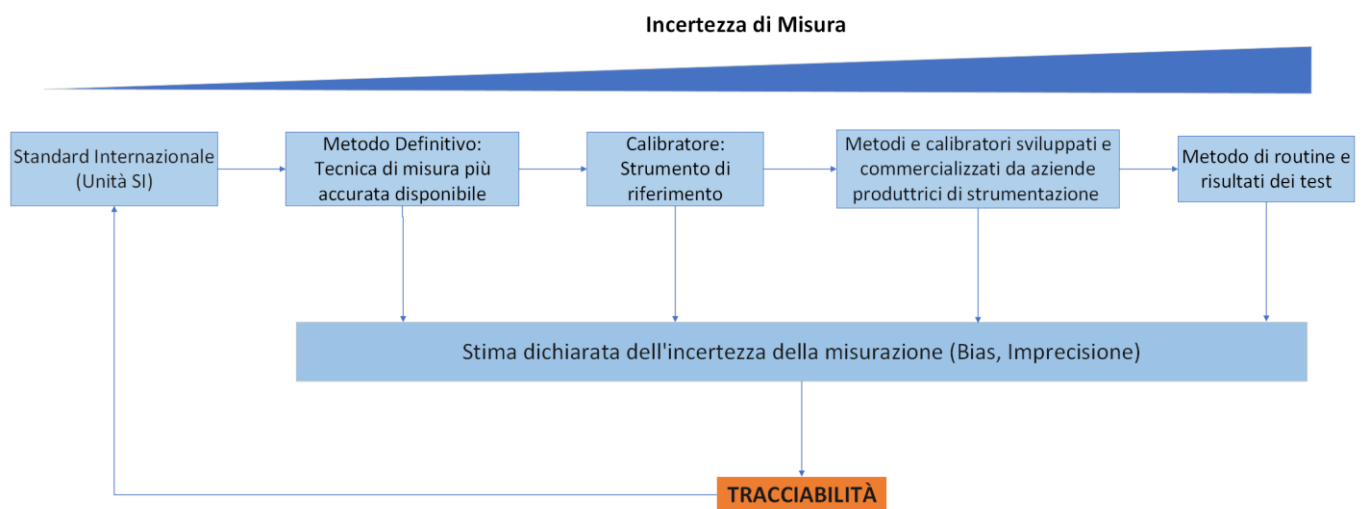


Figura 23: Schema gerarchico della riferibilità metrologica. La piramide mostra la progressione dagli standard primari (vertice) ai metodi operativi (base), con l'incertezza di misura che aumenta progressivamente lungo la catena [13].

3.3. La Strategia di Acquisizione

La pianificazione della strategia di acquisizione delle nuvole di punti è un elemento centrale per garantire che i dati raccolti siano non solo completi, ma anche metrologicamente affidabili. L'utilizzo del cobot permette di programmare sequenze di movimento controllate, così da coprire l'intera superficie di interesse attraverso una serie di campi visivi parziali. Ogni acquisizione produce una **nuvola di punti locale**, che deve essere salvata insieme alla **posizione nominale del cobot** al momento della misura. In questo modo, a ogni nuvola viene associata una trasformazione iniziale nello spazio, utile come base per le fasi successive di fusione.

La copertura dell'area avviene seguendo schemi sistematici, con una parziale ridondanza tra le scansioni adiacenti. Le zone di sovrapposizione, pianificate a priori, diventano essenziali per ancorare correttamente i dati durante l'allineamento. La percentuale di overlap dipende dalla precisione dello strumento e dall'incertezza di posizionamento del cobot, e viene scelta per garantire una robusta identificazione delle corrispondenze.

Le condizioni di acquisizione devono inoltre assicurare stabilità e ripetibilità: l'orientamento relativo tra sensore e superficie deve essere mantenuto costante per ridurre distorsioni e artefatti. Infine, la sequenza di misura è ottimizzata per ridurre tempi morti e movimenti superflui, migliorando l'efficienza operativa senza compromettere la qualità.

La strategia di acquisizione non si limita alla raccolta dei dati, ma stabilisce le condizioni affinché ogni nuvola di punti sia referenziata alla posizione del cobot, costituendo così la base per l'applicazione degli algoritmi di stitching e permettendo di ottenere una topografia globale e continua della superficie in esame.

3.3.2. Filtraggio

I dati di superficie acquisiti non sono sempre direttamente utilizzabili, poiché possono contenere rumore, punti anomali o informazioni non pertinenti. È quindi necessario applicare **operazioni di filtraggio** per separare la forma reale dalle altre componenti geometriche indesiderate e per ridurre il rumore di misura. Questo principio vale anche nella metrologia delle superfici freeform, sebbene, rispetto ad altre tipologie di misure di forma, l'applicazione dei filtri risulti generalmente più limitata.

Nel caso di misure eseguite tramite sistemi robotizzati o cobot, il filtraggio assume un ruolo particolarmente importante. Vibrazioni, micromovimenti, instabilità meccaniche o variazioni nella posizione del sensore possono introdurre rumore eccessivo nei dati acquisiti.

Il filtraggio consente quindi di eliminare punti non affidabili o distorsioni locali, migliorando l'affidabilità complessiva della superficie ricostruita.

La maggior parte dei moderni software di analisi per superfici freeform implementa filtri di base, principalmente per rimuovere outlier tramite soglie o criteri statistici, e per ridurre la densità dei punti quando i dataset risultano eccessivamente grandi.

Secondo la recente serie di standard **ISO 16610**, i filtri servono a separare le diverse componenti geometriche presenti in una superficie misurata e possono essere suddivisi in quattro principali categorie (*Tabella 2*):

- **Filtri lineari:** sostituiscono ciascun punto dei dati con una media ponderata dei punti circostanti. Gli esempi più comuni includono il **filtro Gaussiano**, che attenua le componenti ad alta frequenza mediante una funzione di smorzamento, e il **filtro Spline**, che supera alcune limitazioni della classe dei filtri lineari nelle superfici curve.

- **Filtri morfologici:** si basano su operazioni matematiche di **Minkowski**, in cui un elemento (ad esempio una sfera o un segmento) interagisce con i dati modificandone la forma. Le operazioni fondamentali sono la **dilatazione**, che espande il dataset, e l'**erosione**, che lo riduce.
- **Filtri robusti:** sono progettati per essere **meno sensibili agli outlier**, risultando particolarmente efficaci in presenza di disturbi localizzati o interferenze esterne.
- **Filtri di segmentazione:** dividono la superficie in **zone omogenee**, in modo da isolare le aree o gli oggetti di interesse.

Tipo di filtro	Obiettivo principale	Esempio pratico
Lineare	Rimuovere rumore, separare forma e rugosità	Lisciare dati rumorosi da un sensore laser
Morfologico	Preservare spigoli e caratteristiche locali	Evidenziare cavità o rilievi funzionali
Robusto	Eliminare outlier e valori anomali	Correggere misure con riflessi ottici
Di segmentazione	Suddividere la superficie in zone omogenee	Isolare aree piane o difettose

Tabella 2: Obiettivi principali dei filtri.

L'applicazione dei **filtri lineari** su superfici freeform presenta ancora alcune difficoltà pratiche. La funzione di ponderazione dipende dalla **geometria locale**, e in molti casi la definizione del filtro su una superficie curva non è univoca. L'applicazione del filtraggio solo sulla proiezione planare dei dati può introdurre distorsioni geometriche.

L'impiego dei filtri lineari nelle superfici freeform rappresenta quindi un tema di ricerca ancora aperto, mentre i **filtri morfologici, robusti e di segmentazione** non presentano le stesse problematiche e risultano più adatti a tali geometrie complesse [14].

3.4. Colocalizzazione e Stitching

Nell'ispezione di superfici estese con strumenti a campo di vista (FOV) limitato, la letteratura metrologica individua due operazioni fondamentali: la **colocalizzazione**, che determina la posizione relativa di caratteristiche presenti in FOV separati e non sovrapposti — come i fori di raffreddamento delle turbine (Figura 24) — e lo **stitching**, che combina FOV parzialmente sovrapposti per ottenere una ricostruzione continua della superficie.

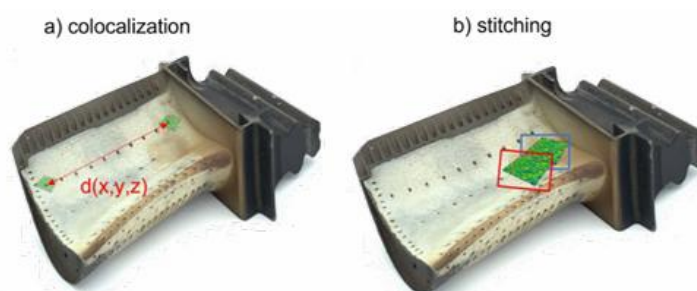


Figura 24: (a) Colocalizzazione e (b) cucitura di due campi visivi [7].

Il presente lavoro si concentra sullo stitching, il cui obiettivo è fondere più FOV parzialmente sovrapposti per ottenere una ricostruzione estesa e coerente della superficie analizzata.

Nel caso di superfici freeform l'allineamento è particolarmente delicato: piccoli errori residui di posizionamento possono generare discontinuità o deformazioni apparenti. La fusione considera sia la posizione nominale del cobot e il margine di incertezza legato alla calibrazione, sia le zone di sovrapposizione tra scansioni, su cui basare la registrazione finale. Tecniche usate, come il downsampling, uniformano la densità della nuvola senza perdere dettagli critici, migliorando la stabilità della fusione e riducendo la sensibilità al rumore.

Ogni nuova acquisizione viene riferita al sistema di coordinate del primo FOV e i parametri di rototraslazione vengono stimati limitando la ricerca agli intervalli realistici definiti dall'incertezza del sistema, minimizzando l'errore quadratico medio (RMSE) nelle zone di sovrapposizione.

Per affrontare le difficoltà legate a superfici complesse, il processo segue un approccio metrologicamente guidato articolato in più fasi. La prima fase è la calibrazione del sistema di movimentazione tramite tracciatore laser, al fine di caratterizzare le prestazioni metrologiche del cobot e quantificarne l'incertezza in termini di ripetibilità, accuratezza ed errore di inversione. Le informazioni ottenute vengono poi propagate per definire i limiti fisicamente plausibili entro cui ricercare i sei parametri di rototraslazione necessari per l'allineamento delle scansioni.

La fase centrale consiste **nell'ottimizzazione bayesiana**, che minimizza l'RMSE nelle zone di sovrapposizione mediante un algoritmo basato su Processo Gaussiano, inizializzato con la posizione nominale del robot e vincolato entro i limiti di incertezza misurati. Infine, la validazione viene eseguita mediante l'algoritmo ICP, impiegato come controllo di coerenza, affiancato da verifiche con software commerciali o sistemi di riferimento metrologicamente tarati, per confermare quantitativamente l'affidabilità del risultato.

L'ottimizzazione bayesiana guida il processo verso una soluzione globalmente ottimale, vincolando traslazioni e rotazioni entro intervalli plausibili e modellando l'errore complessivo come "black-box, fornendo stime predittive e incertezze associate.

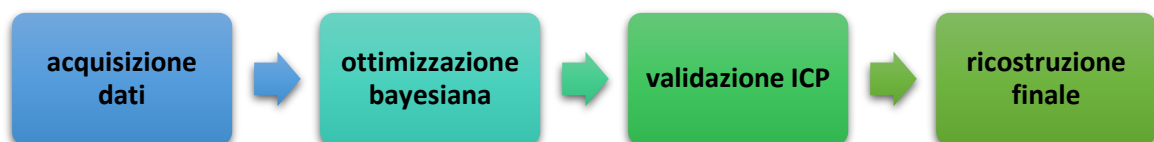


Figura 25: Flusso logico applicato.

Questo approccio offre vantaggi significativi: integra le informazioni di incertezza rendendo lo stitching probabilisticamente fondato e riferibile, garantisce robustezza su superfici complesse ed efficienza

computazionale, e produce nuvole di punti globalmente allineate, consentendo la propagazione delle incertezze fino alla misura finale. La metodologia risulta quindi particolarmente adatta all'ispezione di superfici semplici e freeform in contesti industriali avanzati e in diversi scenari operativi.

3.4.2. Aspetti tecnici del framework basato su scikit-optimize

In questo lavoro, lo stitching delle nuvole di punti acquisite dal cobot, come detto al paragrafo precedente, è stato realizzato usando un algoritmo che combina l'ottimizzazione bayesiana (basata su scikit-optimize) come cuore del metodo, con l'ICP (Iterative Closest Point) impiegato solo in fase di validazione per un caso studio. L'uso di **scikit-optimize** consente di trattare la funzione di errore globale come una “black-box” costosa e rumorosa, modellarla con un processo surrogato, e ottimizzare con funzioni di acquisizione che bilanciano esplorazione ed exploitation.

Di seguito i componenti tecnici fondamentali [15]:

Componente	Descrizione tecnica / implementazione
Funzione obiettivo	La funzione che valuta la bontà dell'allineamento globale per un particolare set di trasformazioni candidate. Nel caso in esame, serve calcolare il RMSE su tutte le regioni sovrapposte per quella configurazione di posa. È una funzione costosa da valutare perché richiede caricare, trasformare le nuvole e calcolare l'errore.
Spazio dei parametri	I parametri da ottimizzare sono gli scostamenti di posa per ogni FOV: traslazioni (δ_x , δ_y , δ_z) e rotazioni (δ_{θ_x} , δ_{θ_y} , δ_{θ_z}). Nel framework bayesiano vanno definiti i <i>bounds</i> per ciascuno di questi parametri, basati sulle incertezze del cobot misurate nella calibrazione.
Modello	Si usa un Processo Gaussiano (Gaussian Process – GP) per approssimare la funzione obiettivo in punti non ancora valutati. Il GP consente di stimare non solo la media prevista dell'errore per una configurazione candidata, ma anche la sua incertezza.
Inizializzazione	Il metodo parte con alcune valutazioni iniziali (posizioni distribuite nel dominio di ricerca) per permettere al GP di costruire una base. Questo è fondamentale per evitare che il processo si blocchi in un minimo locale.
Numero di iterazioni e criteri di stop	Si fissa un numero massimo di chiamate della funzione obiettivo (<i>n_calls</i>) o un criterio di convergenza (per esempio quando il miglioramento atteso è molto piccolo o quando l'errore non cambia significativamente). Il metodo procede iterativamente: ad ogni iterazione il modello GP viene aggiornato con i nuovi dati, si calcola la nuova acquisizione, si valuta la configurazione suggerita e si aggiorna il dataset osservato.
Rumore / incertezza degli input	Poiché le pose nominali del cobot hanno incertezza, e le misure possono contenere rumore o errori residui, viene fatta una pulizia sui dati, cercando, dove è possibile, di eliminare outlier.

Tabella 3: Descrizione implementazione componenti usati nel codice.

In laboratorio, è stato definito un dominio di ricerca per ciascuna trasformazione correggibile, comprendente traslazioni e rotazioni per ogni FOV, utilizzando bound derivati dalle incertezze misurate del cobot. La funzione obiettivo è stata costruita applicando le trasformazioni candidate alle nuvole grezze.

L'ottimizzazione è stata condotta con **gp_minimize** di *scikit-optimize*, configurando parametri come `n_calls`, `n_random_starts`, permettendo un'esplorazione efficiente dello spazio dei parametri.

Solo dopo aver ottenuto la configurazione ottimale è stato applicato l'ICP sulla nuvola finale, sia per confrontarla con i risultati ottenuti dall'ottimizzazione bayesiana sia per valutare eventuali errori residui locali. Per confermare la qualità metrologica, la nuvola finale allineata è stata confrontata con un riferimento, calcolando l'RMSE e analizzando le deviazioni locali. Tra i limiti del metodo si evidenziano l'elevato costo computazionale, la scelta critica dei bound, che, se troppo ristretti possono escludere la soluzione ottimale o, se troppo ampi, richiedere maggiori valutazioni, e la sensibilità del risultato alla qualità del raffinamento locale, cioè dalla precisione con cui viene eseguita la fase di perfezionamento finale dell'allineamento delle scansioni.

3.4.3. Descrizione del flusso di allineamento delle nuvole di punti

Il flusso operativo illustrato nello schema (*Figura 26*) prevede un processo strutturato per l'allineamento progressivo di nuvole di punti acquisite mediante scansioni provenienti da un microscopio a variazione di fuoco integrato ad un braccio robotico. Il programma viene inizialmente avviato caricando i file di input e importando le topografie acquisite. Successivamente viene effettuata una fase preliminare di preprocessing, che include la pulizia dei dati e la rimozione degli outlier, al fine di garantire che l'elaborazione avvenga su dati affidabili e privi di rumore significativo. Contemporaneamente, vengono caricate le pose del cobot e le nuvole vengono trasformate nel sistema di riferimento della prima acquisizione, così da definire un frame comune di lavoro. Conclusa questa fase, il sistema procede all'inizializzazione dei parametri necessari al processo di ottimizzazione.

La fase centrale dell'algoritmo è rappresentata dall'allineamento iterativo step-by-step delle nuvole di punti. In ciascuna iterazione viene definito lo **spazio di ricerca** dei parametri (bounds), ovvero l'intervallo all'interno del quale viene ricercata la trasformazione ottimale. Contestualmente vengono calcolati i centroidi delle nuvole e la direzione di movimento, operazioni utili per caratterizzare la geometria delle scansioni e guidare la fase di ottimizzazione. I dati vengono poi filtrati per ridurre l'impatto del rumore e migliorare l'efficienza computazionale.

Una componente critica di questa fase è l'utilizzo della **KdTree**; si tratta di una struttura dati che consente di eseguire in modo efficiente operazioni di ricerca di *nearest-neighbor*. In particolare, viene eseguita un'analisi bidirezionale: per ciascun punto della nuvola mobile viene individuato il punto più vicino nella nuvola di riferimento e, viceversa, per ogni punto della nuvola di riferimento viene ricercato il corrispondente nella nuvola mobile. Questo approccio simmetrico garantisce corrispondenze più robuste e riduce il bias nell'accoppiamento dei punti. Sulla base di tali correlazioni biunivoche viene calcolato il valore di errore **RMSE**, che rappresenta la metrica principale di valutazione della qualità dell'allineamento.

L'ottimizzazione della trasformazione viene condotta tramite **ottimizzazione Bayesiana**, implementata attraverso la funzione *gp_minimize*. Questo approccio consente di ricercare la soluzione ottimale nello spazio dei parametri in maniera efficiente, riducendo il numero di valutazioni della funzione obiettivo rispetto ai metodi classici di ottimizzazione. Una volta determinati i parametri ottimali, la trasformazione viene applicata alla nuvola mobile, i valori ottimali vengono registrati e le nuvole vengono fuse. I parametri vengono quindi aggiornati in vista dell'iterazione successiva, fino al soddisfacimento di un criterio di arresto basato sul raggiungimento del minimo errore.

Al termine dell'iterazione, il sistema provvede alla visualizzazione del risultato finale e al salvataggio della nuvola completa, concludendo così l'esecuzione del programma. Il processo nel suo complesso permette di ottenere un allineamento accurato e progressivo delle scansioni, sfruttando metodi di filtraggio, ricerca spaziale e ottimizzazione globale per massimizzare la qualità del risultato finale.

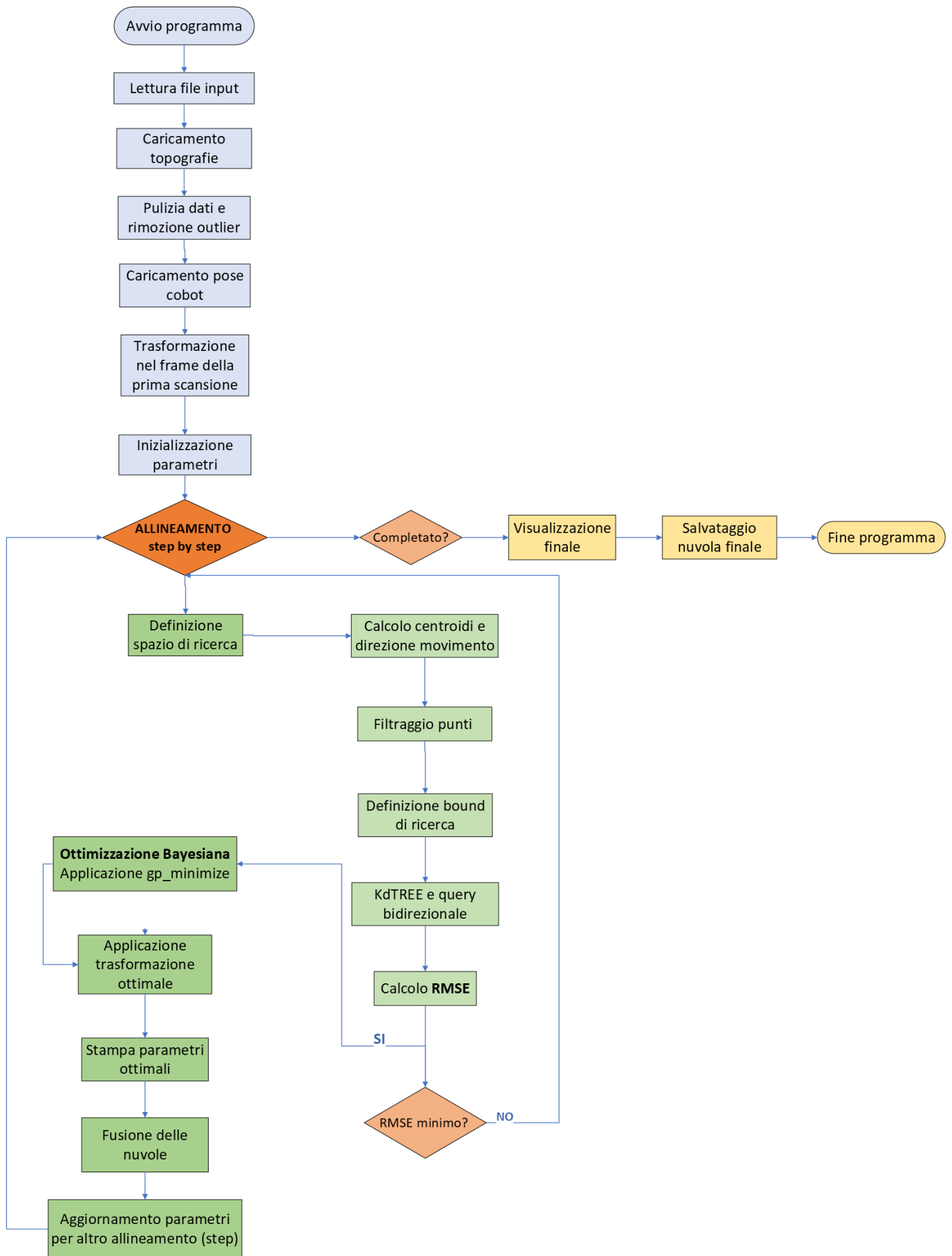


Figura 26: Flow chart dell'implementazione della metodologia di stitching metrologico.

3.5. Dataset iniziale costruito

Come punto di partenza per lo studio e l'implementazione dell'algoritmo su dati reali acquisiti in laboratorio, è stato sviluppato un ambiente di test basato su dati sintetici. Questo approccio consente di isolare e quantificare l'errore introdotto dall'algoritmo in uno scenario controllato e perfettamente noto, fornendo una base solida per validare la pipeline di stitching.

La procedura si articola in diverse fasi logiche.

In **primo luogo**, è stato generato un modello 3D di riferimento rappresentato da una piramide a base quadrata, campionata in modo denso e uniforme sulle quattro facce triangolari. La geometria della piramide prevede una base di 4x4 e un apice posto a un'altezza di 4 unità (*Figura 27*), con punti distribuiti stocasticamente per garantire una copertura omogenea.

Per simulare l'acquisizione multi-campo di uno CMS, la nuvola completa è stata suddivisa in quattro quadranti (q1, q2, q3, q4). La suddivisione non è stata effettuata in modo netto, mantenendo delle zone di sovrapposizione tra i quadranti, fondamentali per garantire continuità geometrica e fornire aree su cui successivamente applicare l'ottimizzazione.

Ogni quadrante rappresenta così una scansione parziale indipendente, simulando la presenza di sistemi di riferimento locali tipici di acquisizioni reali.

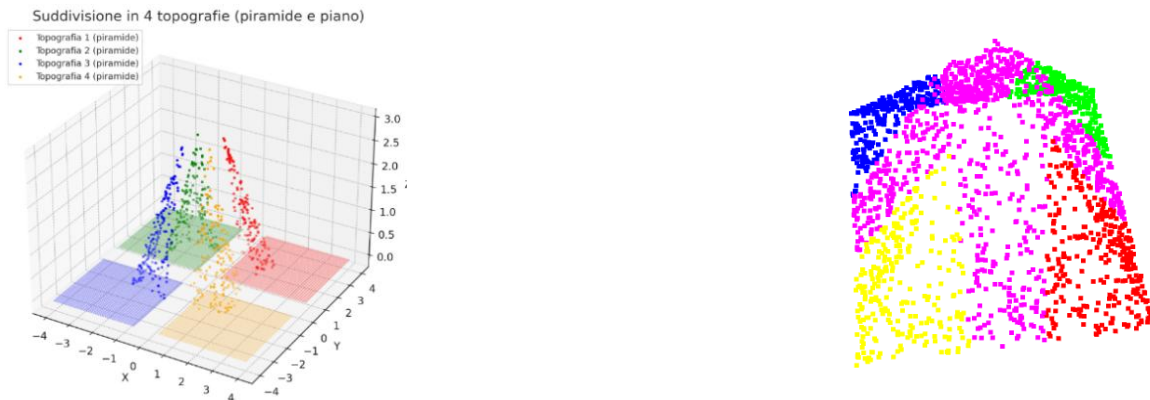


Figura 27: Rappresentazione del dataset creato.

La procedura di stitching si basa sulla funzione ***optimize_alignment***, che implementa un algoritmo di allineamento fondato sulla minimizzazione di una funzione di costo. La minimizzazione è affidata a un algoritmo di Ottimizzazione Bayesiana (*gp_minimize*), applicato **soltanto alle regioni di sovrapposizione tra quadranti**, dove le corrispondenze sono definite e affidabili. Questo approccio migliora significativamente precisione e robustezza, evitando i limiti dei metodi tradizionali come l'ICP e riducendo il rischio di convergenza verso minimi locali.

L'allineamento globale dei quattro quadranti avviene in modo sequenziale: q1 è assunto come riferimento fisso, q2 viene allineato a q1 tramite l'ottimizzazione bayesiana sulle sole zone di sovrapposizione ottenendo i parametri di traslazione ottimali (tx_2 , ty_2), e la nuvola risultante diventa il nuovo riferimento fisso. Successivamente q3 e q4 vengono allineati iterativamente alla nuvola aggregata. Questa procedura simula efficacemente la ricostruzione di un'area estesa a partire da acquisizioni multiple e parzialmente sovrapposte.

La valutazione quantitativa della prestazione è stata effettuata calcolando l'errore quadratico medio (RMSE) nelle regioni di sovrapposizione ad ogni step di allineamento. L'**RMSE**, definito come la radice quadrata della media delle distanze al quadrato tra punti allineati e riferimento, fornisce una metrica standardizzata per misurare la bontà dell'allineamento. Parallelamente, la validazione visiva e metrologica ha permesso di verificare la continuità geometrica della nuvola ricostruita, confermando la corretta aderenza alla forma piramidale originaria.

I risultati hanno mostrato valori di RMSE estremamente bassi (nell'ordine di $<10^{-5}$ unità) per ciascun allineamento, confermando l'efficacia e la precisione dell'algoritmo.

In conclusione, questo test su dati sintetici ha validato la correttezza logica e la robustezza metrologica dell'algoritmo di stitching basato su ottimizzazione bayesiana, fornendo un solido fondamento per l'applicazione futura su dati reali acquisiti dalla piattaforma cobot-integrata, dove dovranno essere considerate ulteriori fonti di incertezza tipiche dei sistemi fisici.

Nei capitoli successivi, verranno analizzati i dataset ottenuti in laboratorio, evidenziando le difficoltà incontrate nella registrazione dei dati reali e le soluzioni implementate per ottimizzare l'allineamento e migliorare la precisione metrologica.

3.6. ICP- Spiegazione della validazione

Per ottenere un allineamento accurato delle nuvole di punti 3D, dopo aver applicato un'**ottimizzazione bayesiana** volta a identificare automaticamente i parametri ottimali di registrazione, per valutare la **robustezza dell'allineamento finale**, come detto precedentemente, si è utilizzato l'**algoritmo ICP (Iterative Closest Point)**, che perfeziona ulteriormente la sovrapposizione delle nuvole riducendo l'errore tra punti corrispondenti.

Questo step, per il dataset sintetico generato ad hoc, si è implementato andando a costruire un modello di partenza da mettere a confronto, senza tagli netti e zone di overlap nelle superfici.

Tale passaggio permette di verificare la coerenza geometrica della nuvola finale e di identificare eventuali discrepanze residue.

Nei casi trattati in laboratorio, su misurazioni prese, usando quindi dati reali, la nuvola risultante è stata confrontata con le misurazioni di riferimento ottenute mediante software commerciali. Le validazioni, che

raccontavano figure piane (lastre) sono state fatte tramite software commerciali, prendendo le stesse misure ottenute dal microscopio a variazione di fuoco. Si vuole dimostrare che il codice implementato può avere la stessa bontà e validità di qualsiasi altro software, e può essere in grado di leggere e prendere punti da oggetti con geometrie anche molto complesse (vedi caso studio freeform).

Infatti, nel caso dell'analisi di superfici freeform, si è usata una **CMM** [6], strumento considerato standard di accuratezza metrologica.

Questo confronto ha dato la possibilità di valutare l'affidabilità dell'allineamento e di confermare se la l'ottimizzazione bayesiana produce nuvole di punti sia visivamente coerenti sia metricamente precise, idonee per applicazioni di ricostruzione 3D e analisi quantitativa.

3.6.2. Applicazione algoritmo ICP

L'**ICP (Iterative Closest Point)** prende in input due nuvole di punti, *source* e *target*, e una trasformazione iniziale approssimata T_{init} , e restituisce una trasformazione raffinata che allinea la nuvola *source* alla nuvola *target*. L'allineamento iniziale può essere ottenuto tramite **global registration**, stime manuali o altre tecniche, e viene valutato con metriche come il **fitness**, che indica la frazione di punti target con corrispondenze valide, e l'**inlier rmse**, che rappresenta l'errore quadratico medio sui punti corrispondenti.

L'algoritmo procede iterativamente: ad ogni passo si trasformano i punti della nuvola *source* secondo la trasformazione corrente T , si identificano le coppie di punti corrispondenti nella nuvola *target* entro una soglia prestabilita, e si calcola una correzione ΔT che minimizza una funzione obiettivo definita sulle coppie corrispondenti. La nuvola *source* viene quindi aggiornata con la nuova trasformazione, e il ciclo si ripete fino a convergenza o al raggiungimento del numero massimo di iterazioni.

Esistono due principali varianti matematiche di ICP:

- La **Point-to-Point** minimizza direttamente la somma delle distanze euclidee tra punti corrispondenti:

$$E(T) = \sum_{(p,q) \in K} \|p - Tq\|^2$$

Questa variante è semplice e robusta, ma può richiedere più iterazioni vicino al minimo.

- La **Point-to-Plane**, invece, proietta l'errore lungo la normale del punto target, minimizzando:

$$E(T) = \sum_{(p,q) \in K} ((p - Tq) \cdot n_p)^2$$

dove n_p è la normale del punto target. Questa variante converge più rapidamente quando le normali sono affidabili, ovvero quando la geometria locale è ben campionata, liscia e senza disturbi.

Entrambe le versioni sono implementate in Open3D con le classi⁴ **TransformationEstimationPointToPoint** e **TransformationEstimationPointToPlane**, e vengono eseguite tramite la funzione **registration_icp**.

⁴ Le classi sono modelli che descrivono oggetti in un programma, definendo quali dati hanno e cosa possono fare. Una **classe** è il modello, l'**oggetto** è la sua realizzazione.

Per un utilizzo efficace, ICP richiede un'inizializzazione accurata, una soglia di corrispondenza adeguata e, per la variante point-to-plane, normali stimate correttamente. È consigliabile eseguire l'algoritmo prima su versioni downsampled delle nuvole di punti per velocizzare i calcoli e successivamente rifinire con la densità completa. Inoltre, aumentando il numero massimo di iterazioni è possibile ottenere un miglioramento dell'RMSE finale. La qualità dell'allineamento può essere valutata non solo con le metriche numeriche, ma anche visivamente tramite funzioni di visualizzazione come ***draw_registration_result***.

ICP è una tecnica di **registrazione rigida**, sensibile a outlier e a mancanza di sovrapposizione tra le nuvole, e non gestisce deformazioni non rigide.

Nei casi studio analizzati, è stato effettuato inizialmente un **allineamento grezzo** per unificare il sistema di riferimento, seguito successivamente da un **allineamento fine**, come descritto nel Capitolo 2. Durante questa fase, lavorando direttamente sulle nuvole di punti, si è ottenuto un buon risultato utilizzando la variante **point-to-point**, che ha permesso di calcolare i valori dell'**RMSE** come misura della qualità dell'allineamento finale.

Grazie alla struttura iterativa e alla possibilità di utilizzare sia la variante point-to-point che point-to-plane, ICP rappresenta uno strumento flessibile per affinare allineamenti locali e verificare la coerenza geometrica di nuvole di punti 3D [7].

Capitolo 4

Validazione sperimentale su oggetti reali

4.1. Caso di Studio 1: Lastra con Incisione “4”

A partire da un dataset già acquisito e da un lavoro preliminare [9], si è proseguito con lo studio e l'analisi delle topografie mediante tecniche di *point cloud stitching*⁵.

Come caso di prova è stata realizzata un'incisione a forma di numero “4” tramite punzonatura su una lastra metallica.

L'attività iniziale, già svolta e documentata, prevedeva la fusione di due sole nuvole di punti, mentre in una fase successiva l'approccio è stato esteso alla ricostruzione completa della topografia, integrando progressivamente tutte le nuvole disponibili fino a ottenere la geometria completa dell'incisione.

Le prime nuvole sono state cucite tramite un *ciclo for*, utilizzando algoritmi di allineamento standard basati sulla minimizzazione della distanza tra punti corrispondenti nelle zone di sovrapposizione.

È stata implementata una funzione che consente l'allineamento **contemporaneo lungo più direzioni**, garantendo accuratezza nella registrazione.

Infine, a validazione dell'allineamento complessivo, è stato calcolato il valore del **RMSE finale**, indicatore quantitativo della qualità della registrazione e della coerenza tra le nuvole di punti cucite, necessario per confermare l'efficacia del processo di stitching e dell'ottimizzazione applicata al fine di poter fornire un risultato robusto e riproducibile per l'intera topografia.

4.1.2. Implementazione della metodologia

Dopo aver descritto la metodologia generale per l'allineamento e la validazione delle nuvole di punti, in questo paragrafo viene presentato un **caso di studio preliminare** volto a testare concretamente l'approccio sviluppato. In particolare, si illustrano le acquisizioni effettuate tramite il **microscopio a variazione di fuoco**, e l'applicazione dell'**ottimizzazione bayesiana informata dall'incertezza** per la stima dei parametri di traslazione e rotazione.

È importante sottolineare che quanto riportato in questa sezione rappresenta un **lavoro già avviato in precedenza** e che i risultati qui descritti costituiscono una **prima validazione sperimentale**, successivamente sviluppata e approfondita nel prosieguo della tesi.

⁵ Indica le tecniche per allineare e unire più nuvole di punti 3D in un'unica rappresentazione coerente.

4.1.3. Filtraggio dei dati

Per poter garantire la qualità e la coerenza dei dati acquisiti, le nuvole di punti ottenute dalle scansioni, nell'implementazione costruita, sono state sottoposte a operazioni di filtraggio preliminare.

In particolare, è stata applicata una **rimozione statistica degli outlier**, basata sulla distanza media dei punti dai loro vicini più prossimi ($nb_neighbors = 35$) e su una soglia definita tramite la deviazione standard ($std_ratio = 3.0$). Questo approccio, riconducibile alla classe dei **filtri robusti** (§3.3.2) descritti dagli standard **ISO 16610**, consente di eliminare punti isolati o influenzati da rumore localizzato, preservando la morfologia complessiva della superficie.

Successivamente, è stato eseguito un **downsampling**, allo scopo di uniformare la densità dei punti e ridurre il carico computazionale durante le fasi di fusione. Questa operazione non altera la geometria della superficie, ma facilita l'elaborazione dei dataset di grandi dimensioni e migliora la stabilità dei processi di registrazione tra scansioni.

L'applicazione di questo filtraggio combina la **pulizia dei dati** tramite rimozione degli outlier con la **riduzione controllata della densità**, fornendo una base solida per le successive fasi metrologiche e garantendo misure affidabili e riferibili su superfici complesse.

4.1.4. Definizione dello spazio di ricerca

Per acquisire le nuvole di punti, si è utilizzato il **microscopio a variazione di fuoco** descritto nel Capitolo 3, definendo l'entità degli spostamenti in modo da ottenere diversi livelli di sovrapposizione tra campi visivi adiacenti, fino a un minimo del 20%.

Per ricostruire l'intero carattere, sono stati acquisiti quattro campi visivi disposti secondo uno schema quadrato (griglia 2x2), con un offset relativo di $\Delta y = 1,7$ mm, corrispondente a una sovrapposizione di circa il 15%.

	t_x / mm	t_y / mm	t_z / mm	$\theta / ^\circ$
Average	1.7	1.7	0	0
U	0.0552	0.0606	0.0693	0.001

Tabella 4: Media e incertezze di misura ($K=2$) per gli assi di movimento l'incertezza della rotazione valutata come tipo B [9].

Seguendo la metodologia esposta nella sezione 3.2 e propagando i contributi di incertezza valutati, sono stati stimati i parametri di incertezza degli assi di movimento. Questi dati hanno permesso di definire i **limiti di ricerca dei parametri** per l'ottimizzazione bayesiana ($t \pm U_t$, $\theta \pm U_\theta$).

L'ottimizzazione è stata quindi applicata per determinare i parametri della matrice di roto-traslazione:

$t = (1.744, 1.7605, 0.0687)$ mm,

$\theta = (-5, 9, -8) \times 10^{-4}$ gradi

ottenuti per la prima coppia di FOV (Figura 28).

I valori misurati di spostamento e rotazione possono differire leggermente da quelli teorici o nominali a causa di piccoli errori sistematici, detti **bias**.

La procedura descritta utilizza un metodo di **machine learning guidato dall'incertezza**, che tiene conto dell'affidabilità delle misure, per stimare questi errori e correggerli. Questo approccio si basa sull'**ottimizzazione bayesiana**, che cerca i valori di correzione più probabili a partire dai dati osservati e dalle incertezze associate, permettendo così di ottenere un allineamento più preciso e vicino alla realtà.

Il processo successivo è iterare per aggiungere ciascun FOV scansionato.

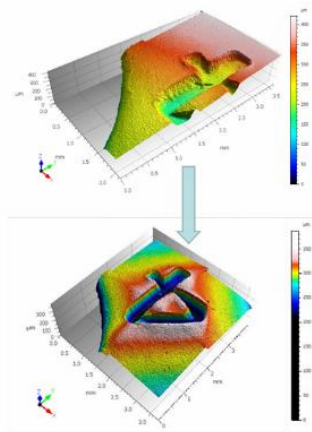


Figura 28: Risultati di cucitura basati su machine learning informato dall'incertezza

Per ridurre il carico computazionale, il bias stimato è stato utilizzato come **pre-correzione**: il terzo FOV è stato inizialmente roto-traslato rigidamente secondo i parametri valutati dal secondo FOV, per poi essere raffinato tramite ottimizzazione bayesiana.

I primi risultati ottenuti indicano che la precisione raggiunta con questo approccio è **confrontabile con quella di strumenti commerciali**. La qualità dell'allineamento è stata valutata tramite il parametro **Sq** della superficie, che misura quanto la nuvola ricostruita si discosta dalla superficie di riferimento.

Il valore misurato, con questa analisi di partenza, circa **50 nm**, è **circa dieci volte più piccolo dello Sq della topografia stessa**, cioè della variabilità naturale della superficie.

Questo significa che l'errore introdotto dall'allineamento è trascurabile rispetto alla struttura reale della superficie e non influisce sulla sua analisi.

In sostanza, la procedura di correzione del bias, basata su ottimizzazione bayesiana e machine learning informato dall'incertezza, permette di ottenere un allineamento molto accurato senza introdurre errori significativi [9].

4.1.5. Sviluppo e implementazione del caso studio

Per sviluppare un **algoritmo completo e generale** volto a completare l'ottimizzazione dell'incisione del "4" e l'allineamento delle altre due topografie, sono state identificate e affrontate diverse problematiche. In una prima fase è stato elaborato un **codice efficiente per la lettura dei file**, in modo da considerare solo le misure valide e rilevanti acquisite dal microscopio. A tal fine sono state create due funzioni dedicate: una per l'apertura e la lettura delle nuvole di punti, e l'altra per salvare le posizioni del cobot associate a ciascuna nuvola.

Successivamente, sono state sviluppate le funzioni necessarie per costruire un **algoritmo di cucitura** delle diverse topografie in un'unica nuvola, con l'obiettivo di minimizzare scarti ed errori tra le misure.

Per la gestione e l'allineamento delle nuvole di punti 3D è stato implementato un insieme di funzioni basate sulle librerie **Open3D**, **NumPy**, **SciPy** e **Scikit-Optimize**, consentendo di eseguire operazioni di preprocessing, trasformazioni, allineamento e ottimizzazione in modo efficiente e modulare.

Funzione	Parametri principali	Descrizione del codice
msgtime	<ul style="list-style-type: none"> ▪ msg: stringa del messaggio da stampare 	Stampa un messaggio relativo all'inizio dell'esecuzione, utile per monitorare i tempi di elaborazione.
leggi_e_pulisci	<ul style="list-style-type: none"> ▪ file_input: percorso del file di punti 	Legge un file di punti 3D, filtra righe non valide, converte coordinate (z in mm) e restituisce un array NumPy dei punti.
leggi_posizioni_rotazioni_robot	<ul style="list-style-type: none"> ▪ file_robot: file delle pose del robot; ▪ angoli_in_gradi: bool 	Legge posizioni e rotazioni del robot da file e restituisce due liste: posizioni (np.array) e rotazioni (Rotation di SciPy).
make_o3d_cloud	<ul style="list-style-type: none"> ▪ points: array Nx3 di punti; ▪ color: RGB opzionale 	Crea e restituisce una nuvola di punti Open3D, con colore uniforme se specificato.
enfattizza_z	<ul style="list-style-type: none"> ▪ points: array Nx3; ▪ fattore: float 	Amplifica la coordinata Z per enfatizzare la profondità in visualizzazione.
crea_frame	<ul style="list-style-type: none"> ▪ size: float 	Crea un frame di riferimento 3D (assi cartesiani) per la visualizzazione in Open3D.
apply_transform	<ul style="list-style-type: none"> ▪ params: [rx, ry, rz, tx, ty, tz]; ▪ points: array Nx3 	Applica una trasformazione rigida (rotazione in gradi e traslazione in mm) ai punti 3D, restituendo la nuvola trasformata.
calculate_rmse_along_motion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ fixed_points; ▪ transformed_points; ▪ raggio: float 	Calcola l'errore medio quadratico (RMSE) tra due nuvole di punti lungo la direzione di movimento, filtrando punti entro un raggio specificato.
optimize_alignment	<ul style="list-style-type: none"> ▪ fixed_points; ▪ moving_points; ▪ t_nom: stima iniziale; ▪ n_calls: iterazioni; ▪ raggio: float; ▪ plot: bool. 	Ottimizza l'allineamento di due nuvole (gp_minimize). Restituisce la nuvola allineata, i parametri ottimali e l'errore minimo.
Objective (funzione interna di <i>optimize_alignment</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ params: [rx, ry, rz, tx, ty, tz] 	Funzione obiettivo per ottenere l'ottimizzazione: applica la trasformazione alla nuvola mobile, calcola l'RMSE con la nuvola fissa e restituisce il valore da minimizzare.
merge_and_downsample	<ul style="list-style-type: none"> ▪ points1, points2: array Nx3; ▪ voxel_size: float. 	Unisce due nuvole e ne riduce la densità tramite downsampling in Open3D.
stampa_parametri	<ul style="list-style-type: none"> ▪ step: descrizione; ▪ params: lista di 6 valori; ▪ cost: float 	Stampa in formato leggibile le rotazioni, traslazioni e l'errore RMSE ottenuti a ogni step di allineamento.

Tabella 5: Descrizione delle funzioni e dei parametri del codice.

La pipeline implementata è riportata in Appendice. Per semplicità, poiché la struttura del codice è identica per tutti i casi analizzati, viene presentato esclusivamente quello relativo al primo caso, ossia l'incisione della lastra del "4", insieme al corrispondente ICP di validazione.

4.1.6. Assunzioni e aspetti considerati nell'implementazione

Al fine di garantire la corretta integrazione delle diverse topografie in un unico modello coerente, è stato necessario gestire attentamente diversi aspetti.

In primo luogo, i **sistemi di riferimento** delle singole scansioni. Ogni nuvola di punti acquisita dal microscopio, infatti, è inizialmente espressa in un sistema di riferimento locale, legato alla posizione e all'orientamento del cobot al momento della misurazione. Per uniformare tutte le scansioni, si è definito il sistema di riferimento della prima scansione come frame globale, riportando tutte le altre nuvole in questo frame mediante trasformazioni rigide rappresentate da matrici omogenee 4×4 . Di fatti, per ciascuna nuvola si calcola la trasformazione relativa rispetto alla prima scansione e si applica a tutti i punti, convertendoli in coordinate omogenee. Questo passaggio è fondamentale perché permette di confrontare e sovrapporre correttamente le nuvole di punti, minimizzando gli scarti dovuti a differenze di posizione e orientamento del cobot.

Successivamente, prima della fase di ottimizzazione vera e propria, è stato introdotto un **pre-allineamento grossolano** basato su una **trasformazione nominale (t_{nom})**, che rappresenta una stima iniziale della rototraslazione tra le nuvole consecutive. Nel codice, tale stima viene utilizzata come punto di partenza per l'ottimizzazione bayesiana (**gp_minimize**), permettendo di avviare la ricerca in una regione già prossima alla soluzione corretta. Questo accorgimento riduce la possibilità che la direzione stimata del movimento sia influenzata da spostamenti iniziali errati e migliora la stabilità e la velocità di convergenza del processo di minimizzazione dell'errore (RMSE).

Il **calcolo delle zone di overlap** è stato un altro step critico da sviluppare.

Come primo passaggio per circoscrivere una zona di sovrapposizione delle nuvole di punti, all'interno del quale applicare ottimizzazione, si è studiata la direzione principale del movimento.

Questa direzione serve per filtrare i punti di entrambe le nuvole, selezionando solo quelli entro un certo raggio dal centro lungo il vettore del movimento. In questo modo si ottengono due sottoinsiemi di punti (**fixed_subset** e **moving_subset**) che rappresentano la zona di sovrapposizione più rilevante, rendendo i calcoli più veloci e robusti.

Questa viene calcolata come vettore che va dal centro della nuvola fissa al centro stimato della nuvola mobile. Se i centri coincidono, viene scelta una direzione convenzionale lungo l'asse X.

Sapendo che nella configurazione adottata, è stato montato un obiettivo a lunga distanza **10x**, che fornisce un campo di vista (FOV) di **2x2 mm**, si è considerato per entrambe le nuvole un raggio di **1mm nella**

direzione della traslazione. Inoltre, sapendo che la traslazione effettiva è di 1,7 mm si restringe il campo di ricerca per identificare overlap, e si accelera l'elaborazione.

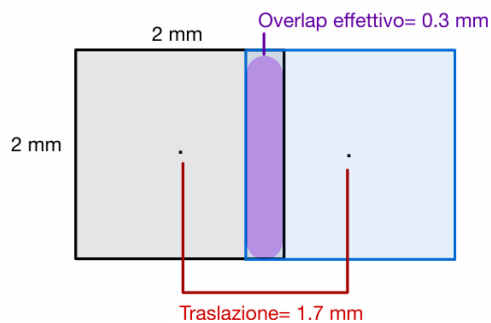


Figura 29: Schema scelta intorno parametro di ricerca overlap (Caso 1).

Parametro	Valore	Implicazione
FOV	2x2 mm	Area di acquisizione
Traslazione	1.7 mm	Movimento tra scansioni
Overlap teorico	0.3 mm	$2.0 - 1.7 = 0.3$ mm

Si è preso il valore di 1 mm per rimanere conservativi sul campo di ricerca, rilevando possibili overlap entro \pm la lunghezza del raggio. In questo modo è stato possibile passare dai 4mm iniziali a 2mm, velocizzando la ricerca.

Per accelerare ulteriormente l'individuazione dei punti più vicini, viene costruito un KDTree sul sottoinsieme dei punti fissi filtrati, definendo, in questo modo, la funzione obiettivo per l'ottimizzazione bayesiana.

Questa funzione prende in input i sei parametri di trasformazione, applica la trasformazione ai punti mobili filtrati e calcola l'errore medio quadratico (RMSE) rispetto ai punti fissi. La corrispondenza viene effettuata in entrambe le direzioni (**mobile** \rightarrow **fisso** e **fisso** \rightarrow **mobile**) e vengono considerati solo i punti reciprocamente corrispondenti, eliminando corrispondenze ambigue.

Lo spazio di ricerca per l'ottimizzazione bayesiana viene definito attorno ai valori nominali t_{nom} entro i limiti stabiliti, in modo da rendere la ricerca efficiente e mirata. L'ottimizzazione (*gp_minimize*) prova diverse combinazioni di parametri, cercando di minimizzare l'RMSE calcolato dalla funzione obiettivo.

Alla fine, la trasformazione ottimale trovata viene applicata a tutti i punti della nuvola mobile originale, ottenendo tutte le topografie completamente allineate. La funzione restituisce quindi tre valori: la nuvola allineata completa, i parametri ottimali della trasformazione e l'RMSE finale ottenuto.

Optimize_alignment permette di allineare in modo automatico e preciso due nuvole 3D, concentrandosi solo sulle zone significative lungo la direzione del movimento, utilizzando sottoinsiemi di punti, corrispondenze reciproche e KDTree per rendere l'algoritmo efficiente, robusto e accurato anche su nuvole grandi o leggermente disallineate.

Questo lavoro ha presentato un algoritmo di stitching metrologicamente informato, in grado di gestire misure topografiche estese acquisite con macchine utensili e strumenti di misura integrati con cobot. Rispetto ad altri metodi disponibili, l'approccio proposto:

- garantisce **riferibilità metrologica** per le operazioni di stitching;
- integra la calibrazione degli assi del cobot e l'incertezza di misura nella procedura di allineamento;
- utilizza un **algoritmo di ottimizzazione bayesiana** per minimizzare l'RMSE della sovrapposizione.

4.1.7. Risultati

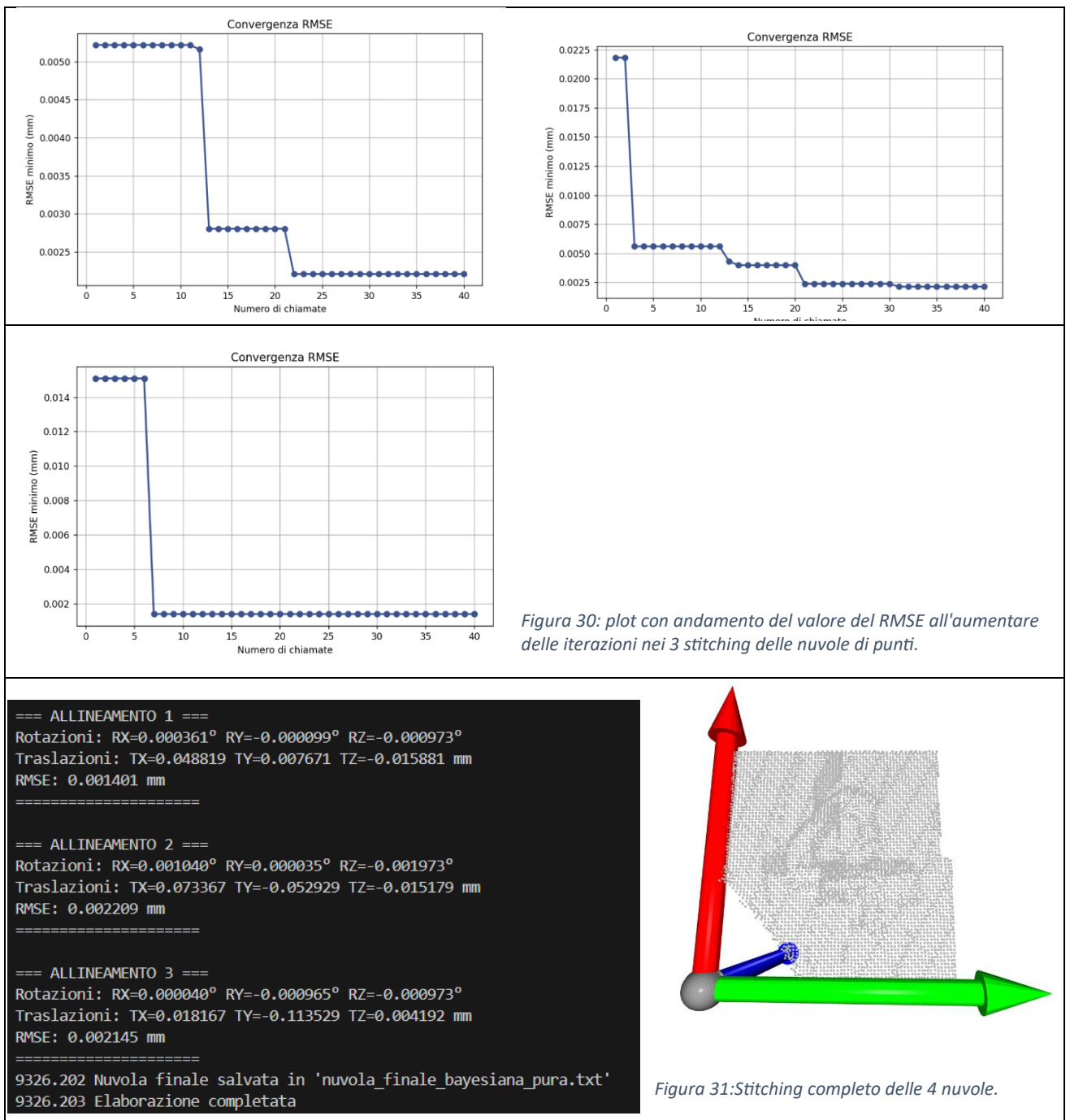


Figura 30: plot con andamento del valore del RMSE all'aumentare delle iterazioni nei 3 stitching delle nuvole di punti.

Figura 31:Stitching completo delle 4 nuvole.

In Figura 31 sono mostrati gli output ottenuti durante l'elaborazione dei dati ad ogni iterazione per la cucitura delle quattro topografie nel processo di registrazione.

Per ciascun allineamento vengono riportate:

- Rotazioni (R_x , R_y , R_z) in gradi;
- Traslazioni (T_x , T_y , T_z) in millimetri;
- RMSE dell'allineamento in millimetri.

Le rotazioni effettuate sono estremamente piccole, segno che i dataset sono già bene allineati e non sono state adattate correzioni angolari significative;

Le traslazioni invece variano tra qualche centesimo e decimo di millimetro per migliorare e ottimizzare la minimizzazione del RMSE.

Per rendere visibile l'andamento dell'errore ad ogni iterazione si è costruito un plot con le curve ad ogni stitching eseguito che, come ci si aspettava, risulta essere decrescente tendendo verso il minimo ricercato.

Dai risultati riportati è rilevante mostrare come l'ordine di grandezza dell'errore calcolato nei punti di sovrapposizione rimane tra 1 μm e 2 μm , segno di un'ottima qualità di allineamento. Le piccole variazioni tra i passaggi indicano un processo di raffinamento che converge verso un minimo stabile.

La nuvola finale salvata in un file rappresenta quindi una registrazione ben convergente e precisa.

Come passaggio successivo, la nuvola risultante è stata presa e usata come base di allineamento per applicare l'algoritmo ICP su una seconda nuvola corretta, contenente l'incisione intera della lastra, ottenuta da un software commerciale (§4.1.8).

Va sottolineata la complessità del processo di elaborazione, dovuta alla grande quantità di dati da gestire. Per motivi di efficienza computazionale, la fase iniziale di sviluppo dell'algoritmo è stata eseguita su metà del dataset, adottando un campionamento che conservava solo una riga su due. Questo approccio ha permesso di testare rapidamente le procedure e di sviluppare le funzioni necessarie, pur consapevoli che la precisione dell'allineamento e l'errore residuo (RMSE) potevano essere ulteriormente migliorati utilizzando l'intero dataset.

Una volta validate le procedure preliminari, e disponendo di computer e mezzi adeguati con GPU, l'elaborazione è stata **estesa alla totalità dei dati**, ottenendo i risultati definitivi riportati in *Figura 31*. Questo passaggio ha permesso di sfruttare pienamente tutte le informazioni disponibili, migliorando la densità della nuvola di punti, la qualità dell'allineamento e riducendo ulteriormente l'RMSE.

4.1.8. ICP- Validazione

È stato implementato un algoritmo di **Iterative Closest Point (ICP) point-to-point** utilizzando la libreria Open3D, per poter validare l'allineamento ottenuto tramite l'ottimizzazione bayesiana.

In primo luogo, le nuvole di punti tridimensionali sono state lette dai file di input:

- la nuvola di riferimento (pc_ref) proveniente dalle misure prese da un software commerciale;
- la nuvola mobile (pc_mov) generata dall'ottimizzazione bayesiana.

Entrambe le nuvole sono state sottoposte a una **pulizia statistica degli outlier**, eliminando i punti isolati o rumorosi che avrebbero potuto compromettere l'allineamento. Per velocizzare i calcoli, la nuvola di riferimento è stata anche sotto campionata tramite **downsampling**, preservando comunque la geometria globale della superficie.

Prima di applicare l'ICP, le nuvole sono state visualizzate nello stato iniziale, consentendo un confronto qualitativo preliminare. L'algoritmo ICP è stato quindi applicato per minimizzare la distanza tra punti

corrispondenti, utilizzando come punto di partenza la trasformazione identità e un threshold di 0,005 mm. L'output dell'ICP fornisce la **matrice di trasformazione ottimale** e l'**errore quadratico medio (RMSE)**, che quantifica la qualità dell'allineamento.

La nuvola mobile è stata trasformata secondo i parametri calcolati dall'ICP e visualizzata insieme alla nuvola di riferimento e al sistema di coordinate. Il confronto visivo e quantitativo può confermare la bontà dell'allineamento, con un RMSE dell'ordine del micron.

Questo approccio, quindi, permette di **verificare sperimentalmente l'efficacia dell'ottimizzazione bayesiana**, mostrando che la nuvola generata dall'algoritmo tende a coincidere con la misura reale, e confermando la validità della procedura di stima dei parametri di traslazione e rotazione.

4.1.9. Risultati (markICP6.py):

```
RMSE: 0.0006098689101363816
Trasformazione finale:
[[ 1.00000000e+00  1.09291176e-05 -3.86492023e-06  1.91930729e-05]
 [-1.09293185e-05  9.99999999e-01 -5.19837043e-05 -1.45576232e-04]
 [ 3.86435209e-06  5.19837465e-05  9.99999999e-01 -8.21733476e-05]
 [ 0.00000000e+00  0.00000000e+00  0.00000000e+00  1.00000000e+00]]
```

Figura 32:Output ICP

L'output riportato mostra il risultato finale dell'algoritmo ICP applicato per la registrazione della nuvola con incisione rispetto alla nuvola di riferimento precedentemente ottimizzata.

L'errore medio quadratico è basso ($0.61 \mu\text{m}$), indicando un allineamento eccellente e un risultato che conferma:

- Un'elevata qualità dei dati acquisiti;
- Una corretta inizializzazione della trasformazione;
- Una convergenza stabile dell'ICP senza divergenze o distorsioni locali.

La trasformazione finale è rappresentata dalla matrice di rototraslazione, necessaria per sovrapporre la nuvola target a quella di riferimento.

Le componenti rotazionali praticamente nulle (0.001°) indicano un già corretto orientamento delle nuvole.

Le componenti traslazionali, nell'ultima colonna della matrice, sono anch'essi molto piccole, tra 10^{-5} e 10^{-4} .

Il processo di ICP ha fornito, dunque, un allineamento di altissima precisione, confermato sia dall'RMSE quasi nullo sia dalla matrice di trasformazione prossima all'identità.

Il risultato, infatti, mostra come non si osservano deviazioni geometriche significative, l'incisione risulta coerente con la geometrica della lastra di riferimento e il risultato finale è metrologicamente stabile.

4.2 Caso di Studio 2: Lastra con Incisione “7”



Figura 33: Incisione lastra metallica usata per il secondo caso studio.

La robustezza e l'affidabilità dell'algoritmo sviluppato sono state valutate testando lo stesso approccio su casi aggiuntivi. In particolare, sono state condotte diverse misure su un'altra lastra di metallo incidendo, per queste analisi, la cifra “7” (Figura 33) e raccogliendo sul momento i dati tramite il microscopio a variazione di fuoco montato sul braccio meccanico, descritto nel capitolo precedente. Per ogni acquisizione sono stati registrati sia i punti delle nuvole 3D sia le pose del cobot.

Le misure sono state effettuate considerando sia la posizione normale della lastra sul piano sia su un piano inclinato, al fine di mettere alla prova l'algoritmo in condizioni diverse e verificare la sua capacità di fornire risultati accurati anche in scenari più complessi.

4.2.2. Acquisizione dati

Il sistema di acquisizione dati implementato in questo lavoro di tesi si basa su un approccio di **scansione multipla** effettuata mediante cobot, progettato per catturare la topografia di superficie da diverse angolazioni e posizioni leggermente sfalsate. Questo metodo, come già evidenziato, permette di ovviare alle limitazioni intrinseche dei sensori ottici, che potrebbero presentare zone d'ombra o risoluzione variabile a seconda della geometria di acquisizione.

Le pose del cobot sono state accuratamente programmate per mantenere una traiettoria sostanzialmente lineare lungo l'asse Y, come evidenziato dai valori delle coordinate cartesiane: partendo dalla posizione iniziale, si osserva un movimento progressivo con traslazioni nominali tra pose consecutive.

Contemporaneamente, le rotazioni negli assi R_x , R_y e R_z mostrano variazioni minime dell'ordine di pochi centesimi di grado, indicando un orientamento sostanzialmente stabile del tool di acquisizione durante tutto il processo.

Il codice sviluppato per l'elaborazione dei dati implementa una strategia di elaborazione articolata come il caso studio precedente.

Le nuvole di punti grezze, infatti, sono state trasformate nel sistema di riferimento della prima acquisizione, applicando trasformazioni rigide calcolate a partire dalle pose relative del cobot.

Questo passaggio fornisce un allineamento grezzo di buona qualità.

4.2.3. Scelta parametri e calcolo overlap

Il calcolo delle zone di overlap è stato anche in questo caso uno step critico, gestito con la stessa logica del caso illustrato nella sezione precedente.

Dalle analisi si è giunti alle seguenti stime da prendere come parametri da usare nel codice.

PARAMETRO	VALORE	IMPLICAZIONE
FOV	2x2 mm	Area di acquisizione
TRASLAZIONE MASSIMA	1.8 mm	Movimento tra scansioni
OVERLAP	0.2 mm	$2 - 1.8 = 0.2$ mm

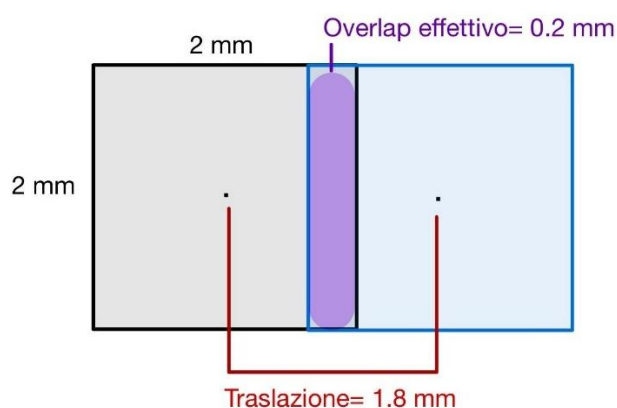


Figura 34: Schema scelta intorno parametro di ricerca overlap.

Per definire in modo accurato il range all'interno del quale cercare i parametri ottimi, si sono fatte le seguenti considerazioni.

Dato l'alto costo computazionale che si ha nel gestire tutti i passaggi implementati, si è tentato di restringere il campo di ricerca per circoscrivere la zona di overlap e velocizzare le operazioni di ottimizzazione.

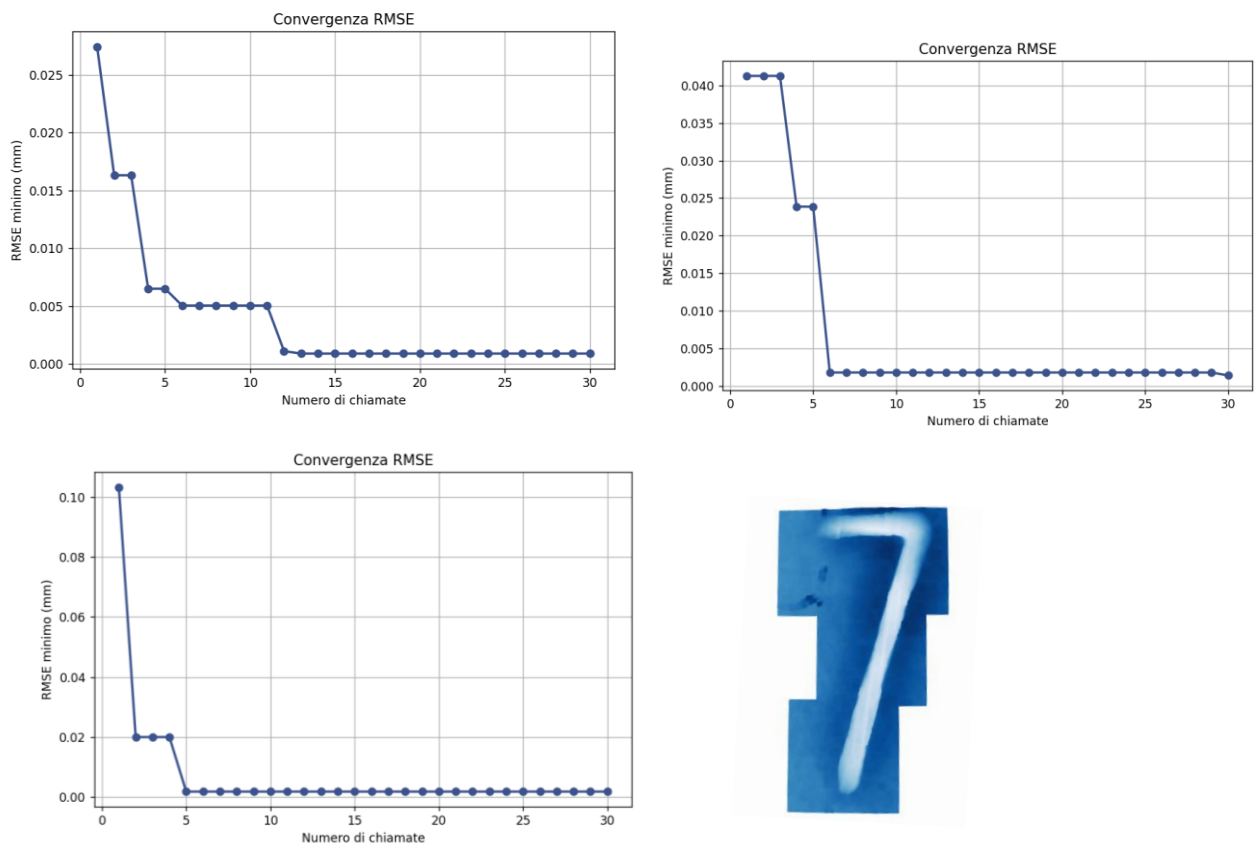
Infatti, sapendo che l'obiettivo del microscopio (10x) ha un campo di vista 2x2 mm, per trovare i punti in comune delle due nuvole, si è preso il valore massimo di traslazione (dalle pose del cobot), in questo caso circa 1.8 mm e si è cercato il valore minimo come distanza (raggio), in modo da coprire tutte le possibili zone di overlap, considerando anche un margine aggiuntivo ϵ .

Il valore considerato rappresenta il miglior compromesso tra accuratezza nell'allineamento ed efficienza computazionale, poiché permette di processare un numero di punti sufficienti per un matching robusto ma ridotto rispetto all'intera nuvola, con evidenti vantaggi in termini di tempo di calcolo.

La validità di questa scelta è confermata dalla coerenza con i dati di traslazione reali e dalla stabilità dei risultati ottenuti nell'allineamento sequenziale delle topografie.

4.2.4. Risultati

I risultati ottenuti mostrano un'ottima convergenza dell'algoritmo di allineamento. In tutti i grafici (*Figura 35*) si osserva chiaramente un andamento decrescente del valore di RMSE al crescere del numero di iterazioni, fino a stabilizzarsi su valori prossimi allo zero. Questo indica che il processo di ottimizzazione ha raggiunto una soluzione stabile e precisa, con errori minimi. L'immagine finale conferma visivamente la corretta sovrapposizione delle parti, dimostrando la bontà dello stitching effettuato.



```

=== ALLINEAMENTO 1 ===
Rotazioni: RX=0.000036° RY=-0.001000° RZ=0.000648°
Traslazioni: TX=-0.029315 TY=-0.060600 TZ=-0.025932 mm
RMSE: 0.000890 mm

=== ALLINEAMENTO 2 ===
Rotazioni: RX=-0.000964° RY=0.000000° RZ=0.001648°
Traslazioni: TX=-0.006605 TY=0.000000 TZ=-0.038755 mm
RMSE: 0.001444 mm

=== ALLINEAMENTO 3 ===
Rotazioni: RX=-0.001783° RY=0.000237° RZ=0.001413°
Traslazioni: TX=0.046744 TY=-0.004028 TZ=0.011132 mm
RMSE: 0.001696 mm

```

Figura 35: Output stitching finale

4.2.5. Risultati ICP

I risultati della topografia ottenuti dal processo di ottimizzazione sono stati validati, anche in questo caso, attraverso un confronto con un output di riferimento derivante da un'acquisizione completa della lastra, salvata nel file 7_sensofar.txt, ed ottenuta tramite il microscopio topografico Sensofar SNEOX in modalità cofocale.

In questa fase è stato utilizzato uno strumento di misura diverso dal microscopio a variazione di fuoco, un microscopio topografico, che ha prodotto una nuvola di punti caratterizzata da una scala di grandezza diversa rispetto a quella generata dal processo di ottimizzazione. È stato quindi necessario individuare una procedura per adattare e rendere confrontabili le due nuvole di punti.

Oltre alla correzione di scala, è stato definito un sistema di riferimento comune, applicando le **rotazioni e traslazioni** opportune per ottenere un primo allineamento tra i dataset.

A causa delle differenze intrinseche tra le due nuvole di punti, il confronto è stato eseguito mediante il software **CloudCompare**. Quest'ultimo ha permesso di eseguire tutte le operazioni necessarie, compreso l'allineamento finale tramite l'algoritmo **ICP (Iterative Closest Point)**, impiegato come metodo di registrazione, con i risultati riportati in *Figura 36*.

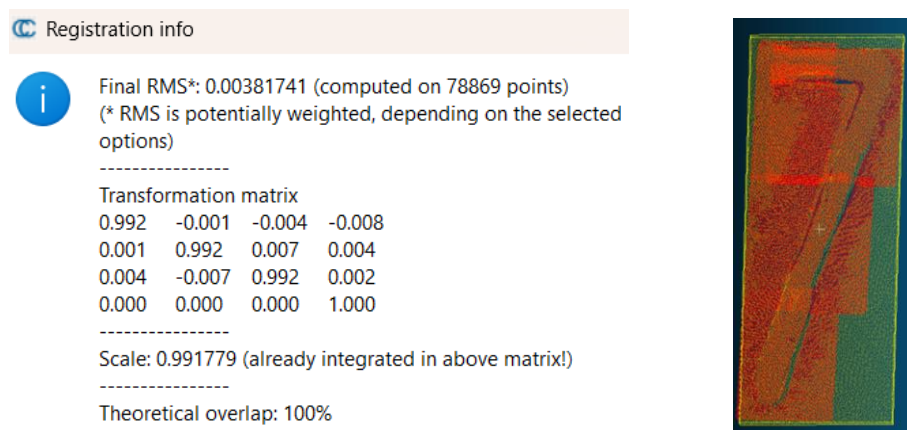


Figura 36: Output ICP dataset "7"

Le nuvole di punti sono state preventivamente scalate e centrate per garantire un allineamento iniziale ottimale e ridurre il rischio che l'ottimizzazione rimanesse intrappolata in minimi locali. L'adozione di un approccio bayesiano ha permesso di modellare in modo robusto le incertezze dei dati e di aggiornare la stima della trasformazione in base alle informazioni osservate, assicurando un allineamento affidabile della nuvola rispetto al modello nominale.

La verifica effettuata con CloudCompare, confrontando l'output con un riferimento, ha evidenziato uno scostamento medio di 3,8 μm , valore che sta ad indicare che l'algoritmo raffigura correttamente la geometria globale della superficie, nonostante la complessità geometrica e il rumore intrinseco dei dati.

I parametri superficiali della lastra con incisione, **Sq = 1,2 μm** e **Sz = 8,4 μm** , mostrano che la superficie è complessivamente liscia, con piccole variazioni locali (Sq) e picchi o valli più marcati (Sz) dovuti all'incisione.

Il confronto tra questi valori e lo scostamento ICP indica che l'allineamento rappresenta fedelmente la topografia globale, mentre le differenze locali riflettono dettagli estremi della superficie.

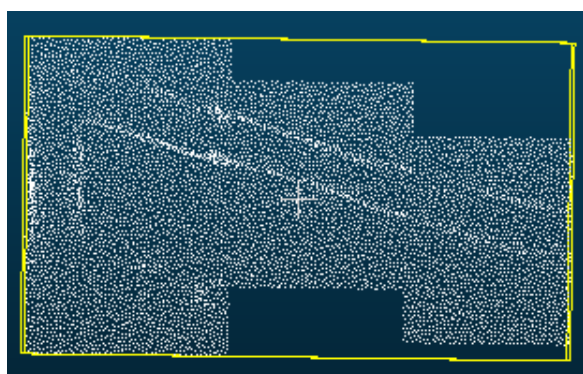
Va sottolineato che il valore ottenuto tramite il software di confronto (RMSE di circa 3 μm) è anche influenzato, come accennato precedentemente, dalle caratteristiche intrinseche dello strumento, poiché la misura usata come riferimento per validare lo stitching è stata acquisita con un dispositivo diverso rispetto al microscopio topografico usato per il riferimento. Questa discrepanza genera inevitabilmente differenze in forme e confini, dovute a risoluzione e rumore.

Di conseguenza, un fit assoluto tra le nuvole non è realistico: alcune deviazioni locali non rappresentano errori dell'algoritmo, ma differenze intrinseche dovute alla modalità di acquisizione dei dati. La necessità di ricorrere ad uno strumento diverso è stata dovuta al fatto che le misure prese con il CMS non seguivano una griglia uniforme, e software commerciali, tipicamente usati per lo stitching, non sono riusciti a gestire tale complessità.

Per questo motivo sono state effettuate **analisi supplementari**, volte a valutare la bontà dell'allineamento e la coerenza complessiva delle superfici, più che la corrispondenza punto-punto.

A ulteriore verifica della correttezza delle elaborazioni effettuate, si è proceduto, sempre tramite il software **CloudCompare**, alla misurazione della lunghezza dell'incisione corrispondente al numero 7. Tale operazione è stata eseguita con l'obiettivo di confrontare i risultati ottenuti dal processo di **stitching** con quelli della misura di riferimento, al fine di valutare la coerenza e l'affidabilità del modello ricostruito.

Dall'analisi dell'immagine riportata si può osservare come la differenza tra i valori misurati lungo la direzione **X** — relativi alla lunghezza del numero 7 (*Figura 37*), prendendo ovviamente come riferimento la stessa scala di misura — risulti ridotta. Tale riscontro rappresenta un ulteriore indice del buon allineamento e della precisione del processo di ricostruzione tridimensionale.



2.6364 (-1.4047 : 1.2317)

2.63372 (-1.40202 : 1.2317)

Figura 37: Analisi supplementare tramite CloudCompare

I risultati ottenuti confermano pertanto la validità del metodo adottato e la corretta sovrapposizione delle diverse acquisizioni all'interno del modello finale.

La differenza tra i due valori è infatti pari a circa 2,68 micrometri, una quantità ridotta da configurarsi come una variazione numerica marginale piuttosto che come un'effettiva discrepanza geometrica, confermando la bontà del processo di ricostruzione tridimensionale.

4.3. Caso studio con piano inclinato:

Il processo è stato applicato sistematicamente allo stesso campione in diverse configurazioni geometriche, inclusa una specifica verifica su un piano inclinato, per poter ulteriormente validare la robustezza e l'affidabilità della metodologia di allineamento sviluppata.

Questa scelta sperimentale è stata determinante per testare la capacità dell'algoritmo di gestire non solo traslazioni e rotazioni minime come nel caso delle pose nominali del cobot, ma anche variazioni angolari significative della superficie di acquisizione. Nel caso del piano inclinato, le trasformazioni iniziali basate sulle pose del robot presentano componenti rotazionali più marcate, mettendo alla prova l'efficacia della fase di ottimizzazione bayesiana nel correggere disallineamenti più pronunciati.

L'algoritmo ha dimostrato eccellenti capacità di convergenza anche in queste condizioni, mantenendo una traiettoria di ottimizzazione stabile e raggiungendo valori di RMSE confrontabili con quelli ottenuti nelle condizioni normali. La procedura iterativa di allineamento sequenziale, si è rivelata sufficientemente robusta da compensare efficacemente le distorsioni geometriche introdotte dall'inclinazione del piano, preservando l'integrità topologica della nuvola di punti finale.

I risultati visivi e quantitativi ottenuti nella configurazione inclinata hanno confermato che la pipeline di elaborazione non dipende criticamente dall'orientamento iniziale del campione, ma può generalizzare efficacemente a diverse geometrie di acquisizione. Questo aspetto risulta fondamentale per future applicazioni industriali dove le superfici da ispezionare possono presentare orientamenti variabili e non standardizzati. Questa validazione aggiuntiva ha quindi consolidato la versatilità del metodo proposto, evidenziandone la maturità per l'implementazione in contesti reali di metrologia avanzata.

4.3.2. Scelta parametri

Nell'implementazione della pipeline è stata essenziale la scelta di alcuni parametri per migliorare efficienza e velocità. Uno tra questi, allo stesso modo dei casi già riportati, è il raggio, usato per restringere il campo di ricerca delle zone di overlap.

Considerando sempre un campo di vista di 2×2 mm e calcolando le traslazioni tra le diverse posizioni del cobot, si osserva che gli spostamenti hanno una traslazione massima di circa 0.985 mm. Dunque, il raggio scelto deve garantire la copertura completa della zona di sovrapposizione teorica, data dalla differenza tra il campo di vista e la traslazione massima, andando a valutare la zona \pm nell'intorno del centro della topografia usata come riferimento.

Il valore utilizzato fornisce un margine di sicurezza sufficiente per compensare le incertezze di posizionamento e le variazioni nelle traslazioni effettive, assicurando l'inclusione di tutti i punti rilevanti per un allineamento accurato (*Figura 38*).

PARAMETRO	VALORE	IMPLICAZIONE
FOV	2x2 mm	Area di acquisizione
TRASLAZIONE MASSIMA	0.9536 mm	Movimento tra scansioni
OVERLAP	1.0464 mm	$2 - 0.9536 = 1.0464$ mm

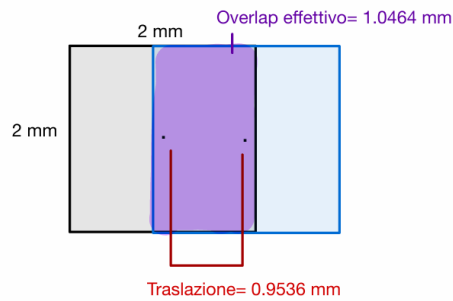
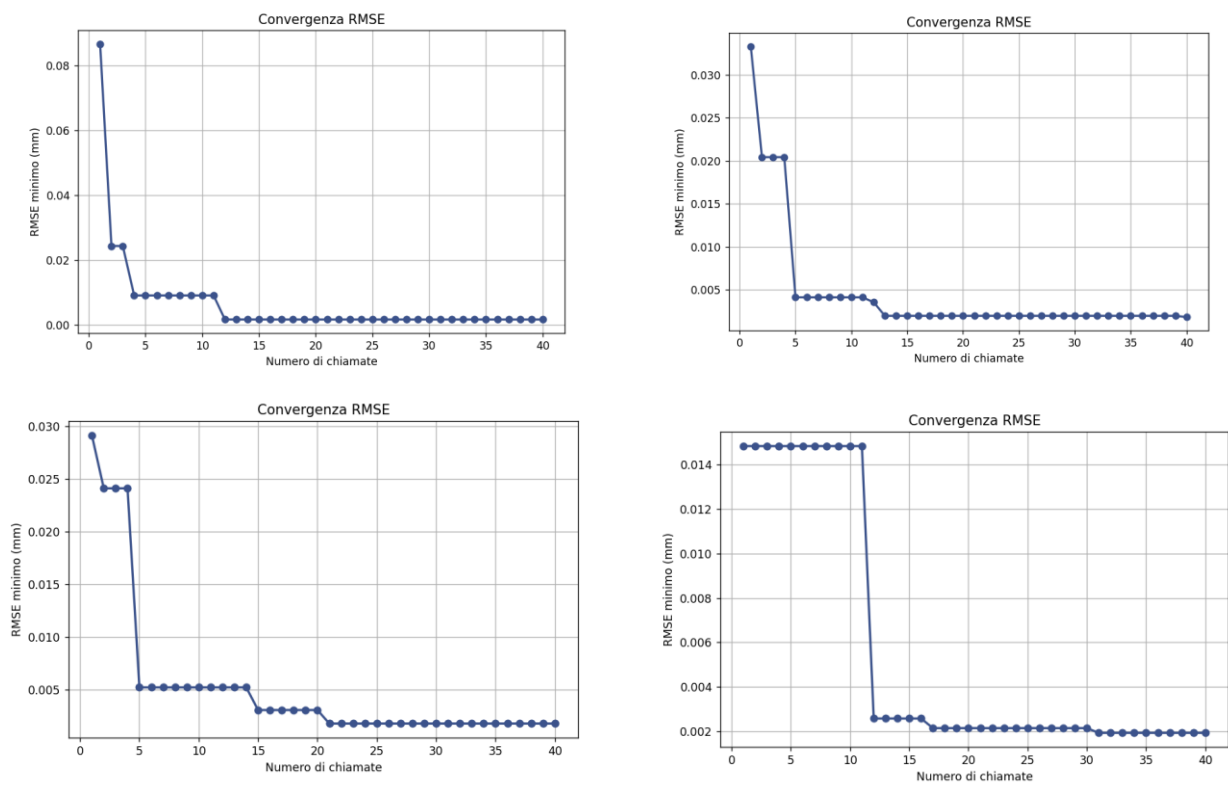


Figura 38: Schema per la scelta intorno parametro di ricerca overlap.

4.3.3. Risultati



```

=== ALLINEAMENTO 1 ===
Rotazioni: RX=-0.001000° RY=0.001000° RZ=0.001000°
Traslazioni: TX=0.083300 TY=0.083300 TZ=-0.083300 mm
RMSE: 0.001679 mm
=====

=== ALLINEAMENTO 2 ===
Rotazioni: RX=-0.002000° RY=0.000000° RZ=0.002000°
Traslazioni: TX=0.166600 TY=0.166600 TZ=-0.119253 mm
RMSE: 0.001825 mm
=====

=== ALLINEAMENTO 3 ===
Rotazioni: RX=-0.003000° RY=-0.000043° RZ=0.002606°
Traslazioni: TX=0.249900 TY=0.249900 TZ=-0.149799 mm
RMSE: 0.001783 mm
=====

=== ALLINEAMENTO 4 ===
Rotazioni: RX=-0.002000° RY=-0.001043° RZ=0.001606°
Traslazioni: TX=0.250430 TY=0.166600 TZ=-0.133162 mm
RMSE: 0.001922 mm

```



Figura 39: Output stitching finale con piano inclinato.

Va sottolineato che i risultati dell'allineamento ottenuti non rappresentano le prestazioni massime raggiungibili dall'algoritmo. Per motivi di efficienza computazionale, nella fase di lettura del file grezzo è stata adottata, in questo caso, una strategia di campionamento che conserva soltanto una riga ogni due, prendendo in considerazione dunque metà dataset. In questo modo la nuvola di punti di riferimento risulta ridotta rispetto ai dati originari, con conseguente perdita di densità e di dettagli geometrici.

Tale scelta permette di velocizzare l'elaborazione e riuscire ad avere in tempi brevi un output valido, seppur non definitivo, non avendo sfruttato a pieno l'informazione contenuta nel dataset.

4.3.4. Risultati ICP (caso piano inclinato)

Come descritto nella sezione 4.2.5., prima di applicare ICP, si è proceduto con un iniziale allineamento, per adattare le scale della nuvola finale ottenuta tramite ottimizzazione bayesiana e quella misurata da microscopio topografico.

Registration info

Final RMS*: 0.006762 (computed on 23992 points)
(* RMS is potentially weighted, depending on the selected options)

Transformation matrix

0.985	-0.003	0.002	0.023
0.003	0.985	-0.003	0.001
-0.002	0.003	0.985	0.021
0.000	0.000	0.000	1.000

Scale: 0.984646 (already integrated in above matrix!)

Theoretical overlap: 100%



Figura 40: Output ICP incisione "7" nel caso di piano inclinato

Nel caso della lastra posizionata su piano inclinato, la verifica effettuata con **CloudCompare** ha mostrato uno scostamento medio pari a $6,7\text{ }\mu\text{m}$, un valore superiore rispetto a quelli ottenuti negli altri test. Tuttavia, questo risultato va interpretato con attenzione, poiché lo studio è stato condotto su metà dataset, quindi non comprendente l'intera quantità di informazioni disponibili, condizione che può influenzare l'accuratezza del confronto. Inoltre, la presenza del piano inclinato introduce ulteriori complessità geometriche che possono amplificare localmente le differenze tra i modelli, mentre l'utilizzo di strumenti di misura differenti per l'acquisizione delle nuvole di punti destinate allo stitching da quello di riferimento comporta inevitabili variazioni dovute a risoluzioni e principi di misura diversi. Considerando complessivamente questi fattori, lo scostamento osservato non può essere interpretato come un indicatore di scarsa qualità della ricostruzione, ma come un effetto delle condizioni sperimentali e delle limitazioni dei dati disponibili. Per confermare la validità dei risultati e la coerenza generale delle superfici, è stata comunque eseguita un'**analisi supplementare** di verifica metrologica.

È stata misurata la lunghezza dell'incisione del numero "7" tramite CloudCompare. Il confronto con il riferimento ha evidenziato la correttezza dell'allineamento, la coerenza tra le diverse acquisizioni e la precisione complessiva del modello tridimensionale, dimostrando l'efficacia dell'algoritmo anche in presenza di condizioni più complesse come il piano inclinato.

In particolare, il valore misurato della lunghezza, $2,6221\text{ mm}$, risulta estremamente vicino a quello di riferimento, $2,62235\text{ mm}$, confermando l'accuratezza del processo di stitching e dell'allineamento.

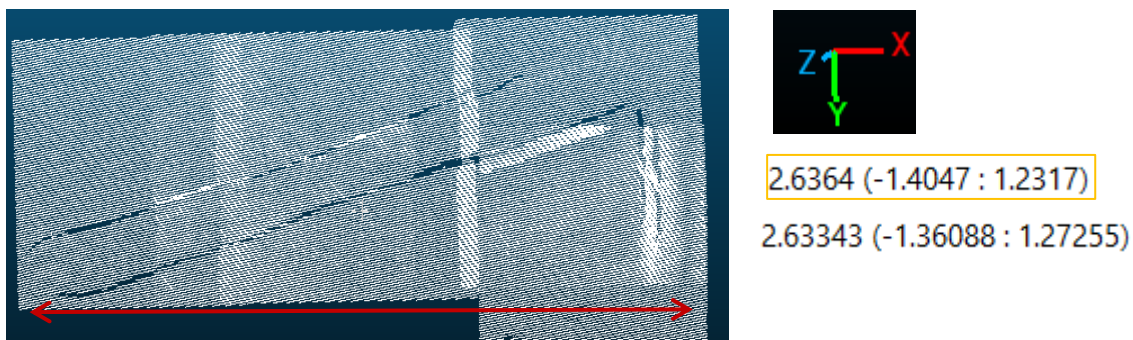


Figura 41: Analisi supplementare tramite CloudCompare- caso piano inclinato.

4.4. Caso di Studio 3: Superfici Freeform

La validazione finale è stata l'applicazione dell'algoritmo su **componenti freeform**, i più complessi analizzati nei capitoli precedenti.

Questi oggetti, privi di riferimenti geometrici semplici e di assi di simmetria, rappresentano una sfida significativa per la misurazione e l'allineamento delle nuvole di punti. La loro complessità deriva da curvature continue, zone lisce prive di dettagli univoci e dalla sensibilità a piccoli errori di posizionamento del sistema di acquisizione, come un cobot o altri dispositivi meccatronici. Per ottenere una **ricostruzione**

accurata e coerente, è fondamentale combinare procedure di colocalizzazione precise, che stimino correttamente la posizione relativa delle scansioni, con strategie di fusione che garantiscono continuità tra i campi visivi. La gestione dell'incertezza, derivante sia dalla meccanica sia dalle misure, diventa inoltre cruciale, poiché consente di quantificare l'affidabilità della nuvola di punti finale e di mantenere la riferibilità metrologica, assicurando risultati robusti anche su geometrie complesse e superfici prive di riferimenti evidenti.

4.4.2. Caso studio: Inserto da taglio

Un caso di validazione ha riguardato l'analisi di un **inserto da taglio** in metallo duro Dormer Pramet (Figura 42), caratterizzato da una geometria complessa e priva di riferimenti semplici, assimilabile a una superficie freeform in ambito metrologico. Si tratta di un

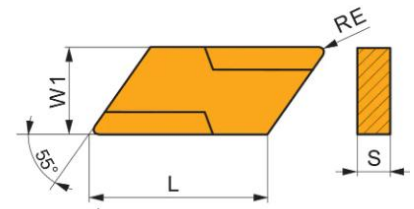


Figura 42: Inserto da taglio per tornitura [16].

inserto negativo per tornitura, con forma a parallelogramma e **angolo incluso di 55°**, **raggio di punta pari a 0,5 mm** e **spessore di circa 4,75 mm**, realizzato in metallo duro rivestito con tecnologia MT-CVD. Tale configurazione, associata a un frangitruciolo, lo rende adatto a operazioni di sgrossatura e finitura su acciai e ghise, garantendo buona resistenza all'usura, stabilità termica e qualità della superficie lavorata [16].

La necessità di descrivere con precisione i taglienti, comprese le curvature locali e le discontinuità geometriche a scala micrometrica, ha reso indispensabile l'acquisizione di più campi visivi. Questi sono stati successivamente ricomposti attraverso procedure di stitching ottimizzate mediante approcci bayesiani, permettendo di ottenere un modello 3D completo e coerente della superficie, riducendo ridondanze e incertezze.

Dal modello ricostruito possono essere estratte grandezze fondamentali, come il raggio di arrotondamento del tagliente, gli angoli caratteristici di spoglia e le micro-scheggiature dovute a usura. Questi parametri non solo permettono di prevedere con precisione la vita residua dell'utensile, ma forniscono anche indicazioni dirette sulle prestazioni in processo, inclusi forze di taglio, formazione del truciolo e qualità superficiale del pezzo lavorato.

L'approccio adottato offre quindi una duplice utilità:

- Sul **piano metodologico**, consente una gestione rigorosa dell'incertezza e l'allineamento accurato di geometrie prive di simmetria.
- Sul **piano applicativo**, i dati metrologici ottenuti possono essere impiegati per un **controllo qualità completo degli utensili**. Confrontando i parametri geometrici con le specifiche di progetto, è possibile identificare deviazioni, micro-difetti o scheggiature, quantificarne l'entità e classificare gli

utensili in base alla loro idoneità. Ciò supporta decisioni rapide sulla sostituzione o rettifica, fornendo un feedback diretto alla produzione.

Inoltre, le informazioni raccolte possono alimentare programmi di **manutenzione predittiva**, ottimizzare i cicli produttivi e validare modelli numerici per la simulazione dei processi di asportazione di materiale, chiudendo così il ciclo tra metrologia avanzata e applicazioni industriali concrete.

Lo stitching, in questo contesto è la chiave che trasforma una serie di misurazioni parziali in un quadro completo, preciso e immediatamente utilizzabile per migliorare qualità, efficienza e affidabilità in produzione.

4.4.3. Acquisizione dataset di un oggetto freeform

L'acquisizione del dataset relativo ad un oggetto freeform è stata adottata attraverso una strategia di misura mirata e intelligente, finalizzata a prendere come riferimento l'angolo del tagliente, pari a 55° .

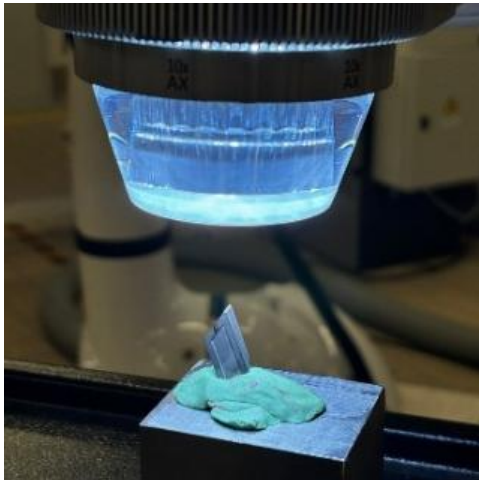


Figura 43: Acquisizione nuvole di punti dell'oggetto freeform in laboratorio.

I dati sono stati presi da una prima faccia dell'oggetto, da cui sono state rilevate le misure laterali. Successivamente, l'obiettivo del microscopio è stato spostato lungo il vertice del tagliente, per poi passare all'altra faccia opposta. Questo procedimento ha permesso di rappresentare in modo accurato il vertice del tagliente e, in un secondo momento, di confrontarlo con l'angolo teorico di riferimento e con altre misurazioni già effettuate.

Le diverse nuvole di punti sono state successivamente stitchate tramite l'algoritmo bayesiano precedentemente implementato.

Tale processo di fusione e allineamento è stato fondamentale per validare il metodo di acquisizione e ottimizzazione proposto.

Per verificare la correttezza dell'allineamento e dell'ottimizzazione, sono state effettuate misurazioni di controllo tramite CMM (Coordinate Measuring Machine).

I valori dell'angolo ottenuti con questa tecnica sono stati quindi comparati con i parametri ricavati dall'elaborazione delle nuvole di punti, al fine di valutare la precisione complessiva del metodo.

4.4.4. Metodologia applicata

Il dataset acquisito per il tagliente presenta caratteristiche differenti rispetto agli altri casi analizzati. Per questo motivo è stato necessario adattare in parte la procedura di acquisizione e trattamento dei dati, pur mantenendo invariato l'algoritmo di ottimizzazione e il codice di elaborazione già impiegati negli altri casi studio.

Nel dettaglio, sono state acquisite sei nuvole di punti complessive, corrispondenti a sei pose differenti del cobot:

- Due nuvole relative a una prima faccia laterale, acquisite da due diverse pose del cobot;
- Due nuvole acquisite nella zona del vertice del tagliente, anch'esse da due pose differenti;
- Due nuvole relative all'altra faccia laterale, sempre da due pose distinte.

A differenza dei casi precedenti, la geometria dell'oggetto in esame — essendo freeform e non piana — ha richiesto che le operazioni di allineamento e ottimizzazione fossero eseguite progressivamente, in più fasi. Questo approccio ha permesso di monitorare l'evoluzione dello stitching e di migliorarne la qualità passo dopo passo.

Infatti, la complessità è derivata dal fatto che le diverse nuvole di punti necessitavano di valori limite (bounds) specifici e non sempre uguali per ciascun passo di ottimizzazione. L'utilizzo di parametri identici per tutte le nuvole, come fatto per altri dataset, avrebbe infatti potuto generare risultati non ottimali, a causa di bounds di ricerca talvolta troppo ampi o, al contrario, eccessivamente ristretti in alcune fasi.

4.4.5. Risultati

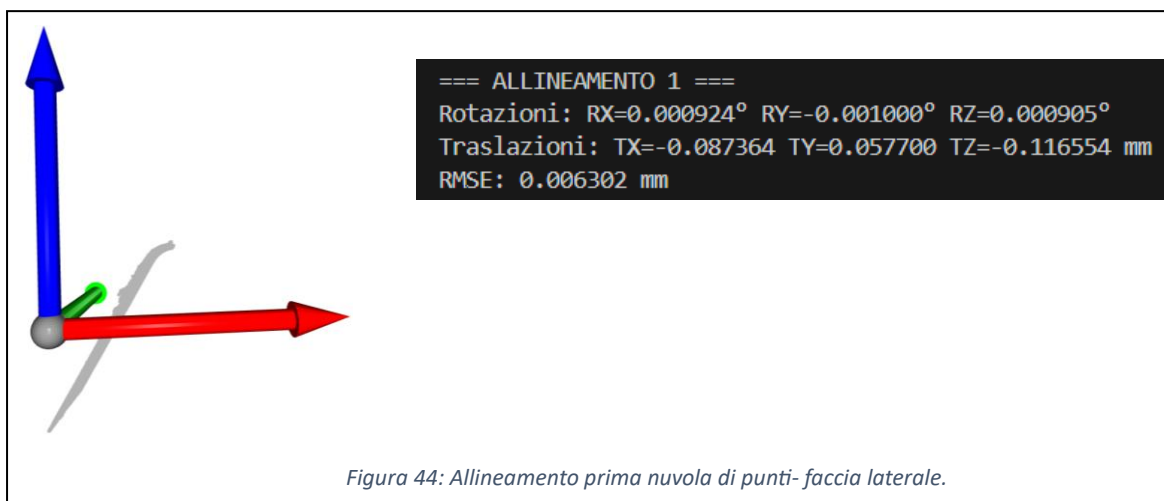
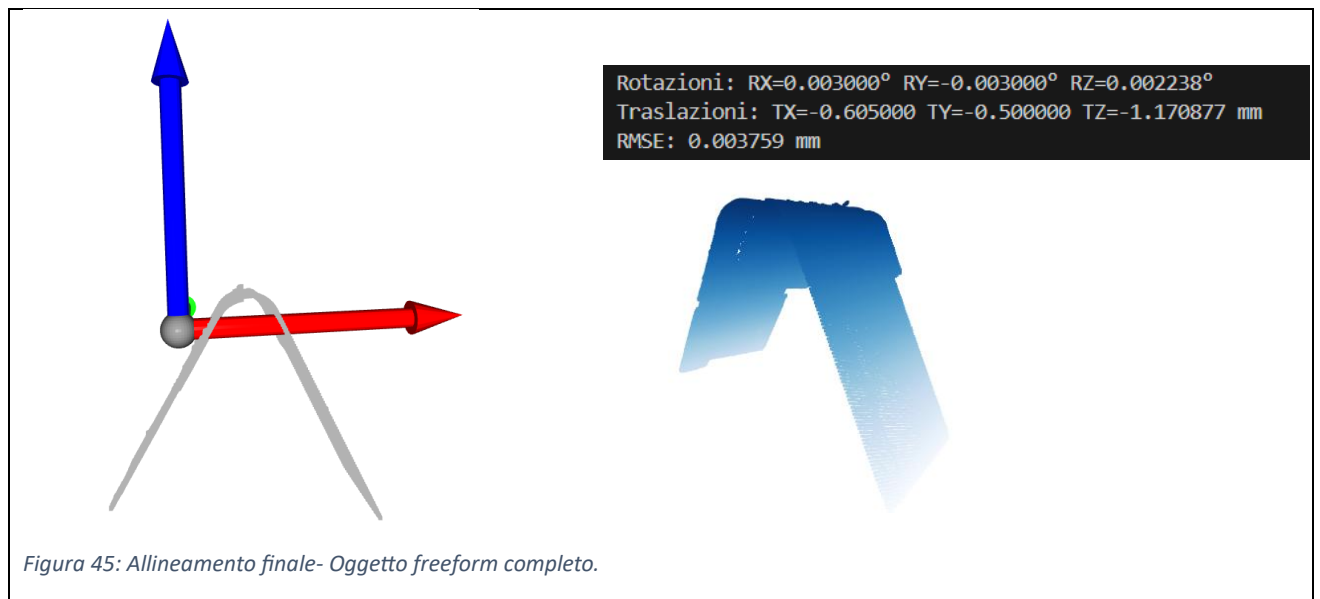


Figura 44: Allineamento prima nuvola di punti- faccia laterale.

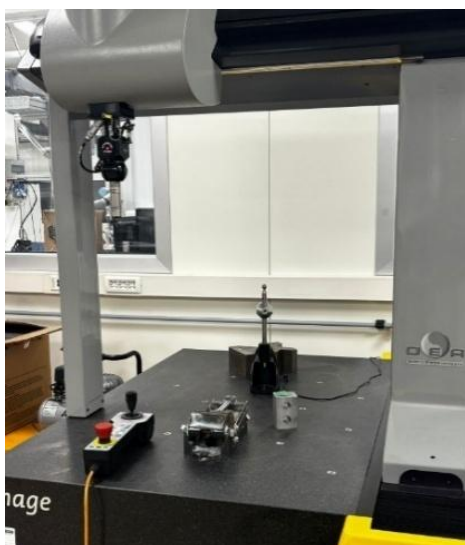
Gli output ottenuti per l'oggetto freeform sono stati elaborati riducendo le dimensioni del dataset iniziale, a causa dell'elevato costo computazionale richiesto dalle analisi. È quindi importante sottolineare che, utilizzando l'intero insieme di dati e quindi considerando la totalità dell'informazione disponibile, i valori di RMSE relativi all'allineamento potrebbero risultare più bassi e dunque migliori, riflettendo una maggiore accuratezza complessiva del processo.



Il risultato finale riportato (Figura 45) si riferisce a un processo di allineamento tra due modelli, in cui vengono indicate le rotazioni, le traslazioni e l'errore medio dell'operazione. Le rotazioni ($RX = 0.003000^\circ$, $RY = -0.003000^\circ$, $RZ = 0.002238^\circ$) mostrano che sono state necessarie correzioni angolari minime lungo i tre assi principali, segno che i modelli erano già orientati tra loro. Le traslazioni ($TX = -0.605000$ mm, $TY = -0.500000$ mm, $TZ = -1.170877$ mm) rappresentano piccoli spostamenti lineari eseguiti per allineare le posizioni dei due oggetti nello spazio, tutti inferiori a pochi millimetri. Infine, il valore di RMSE pari a 0.003759 mm indica l'errore medio quadratico residuo dopo l'allineamento. Rappresenta un valore estremamente basso, che conferma l'elevata precisione del risultato.

L'allineamento è stato eseguito con ottima accuratezza, richiedendo solo minime rotazioni e traslazioni per ottenere una corrispondenza quasi perfetta tra i modelli.

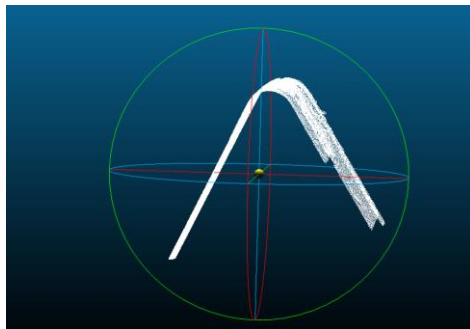
4.4.6. Validazione- CMM



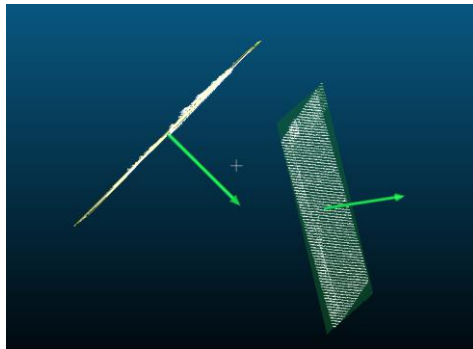
La validazione dell'algoritmo in questo caso studio è stata svolta eseguendo misurazioni di riferimento mediante l'utilizzo della macchina di misura a coordinate (CMM), Figura 46. Ciascun piano (faccia dell'inserto da taglio) è stato sottoposto a tre sessioni di misura indipendenti, al fine di ridurre l'influenza del rumore strumentale e garantire una maggiore affidabilità statistica dei risultati. A partire dai dati acquisiti, è stato calcolato l'angolo di riferimento tra i piani.

Figura 46: Misure oggetto freeform usando una CMM

Successivamente, l'angolo ottenuto dalle misurazioni CMM è stato confrontato con quello determinato attraverso la procedura di *stitching*, impiegando un test d'ipotesi statistico. Tale analisi ha permesso di valutare la coerenza tra i due metodi di misura e di verificare la capacità dell'algoritmo di fornire risultati accurati e comparabili con le misure di riferimento.



Primitive	
Type	Plane
Normal	(0.911 ; -0.0193696 ; 0.411952)
Dip / Dip dir. (...)	(66 ; 91) deg.
Dip / Dip dir.	(65.67; 91.22) deg.
Show normal ...	<input checked="" type="checkbox"/>



Primitive	
Type	Plane
Normal	(0.855213 ; -0.0707429 ; -0.513426)
Dip / Dip dir. (...)	(59 ; 275) deg.
Dip / Dip dir.	(59.11; 274.73) deg.
Show normal ...	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 47: Piani di riferimento da CloudCompare

La nuvola di punti ottenuta, salvata in formato **.txt**, è stata importata nel software **CloudCompare**. All'interno del programma, al fine di determinarne l'angolo — parametro fondamentale per il confronto — sono stati definiti, per semplicità, **due piani di riferimento**. Da questi piani sono stati calcolati i **vettori normali** (Figura 47) e, applicando le consuete operazioni di algebra vettoriale, è stato infine determinato **l'angolo compreso tra essi**.

L'angolo θ tra due vettori tridimensionali

$$\vec{v}_1 = (0.911000, -0.019370, 0.411953) \text{ e}$$

$\vec{v}_2 = (0.855213, -0.070743, -0.513426)$ è stato calcolato tramite il prodotto scalare, secondo la relazione:

$$\cos(\theta) = \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{|\vec{v}_1| |\vec{v}_2|}$$

Dai calcoli effettuati è stato ottenuto un valore dell'angolo pari a **55,3221°**, che verrà successivamente confrontato, mediante test di ipotesi, con quello ricavato dalle misurazioni eseguite con la macchina CMM, al fine di valutarne l'attendibilità e la coerenza rispetto ai dati di riferimento.

4.4.7. Test di ipotesi

<div><div>Pc</div></div>		PART NAME : cutting tool M Mondello				ottobre 10, 2025		16:53		
		REV NUMBER :		SER NUMBER :			STATS COUNT : 1			
<div>∠</div>	DEG	ANGL1 - PLN1 TO PLN2								
AX		NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL			
A		0.000	0.000	0.000	-55.512	-55.512	55.512			
		FEATURE	HITS	MEAS X	Y	Z	VECTOR I	J	K	DEV
		PLN1	0	278.540	75.352	-662.798	0.511	-0.077	0.856	294.212
		PLN2	0	282.612	75.356	-662.758	-0.419	-0.080	0.904	298.033
<div>∠</div>	DEG	ANGL2 - PLN3 TO PLN4								
AX		NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL			
A		0.000	0.000	0.000	55.380	55.380	55.380			
<div>∠</div>	DEG	ANGL3 - PLN5 TO PLN6								
AX		NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL			
A		0.000	0.000	0.000	-55.676	-55.676	55.676			

Figura 48: Output CMM

	Angolo (°)
Calcolo da normali	55,3221
CMM	55,5120
CMM	55,3800
CMM	55,6760
Media	55,4725
Scarto tipo	0.1482

Tabella 6: Valutazioni su media e scarto tipo.

I valori ottenuti evidenziano una buona coerenza tra l'angolo calcolato tramite le normali delle superfici ricostruite e le misurazioni effettuate con la CMM. La differenza tra il valore medio (55,4725°) e l'angolo ricavato dalle normali (55,3221°) risulta contenuta, indicando che l'approccio geometrico impiegato fornisce una stima affidabile dell'orientazione relativa dei piani.

Lo scarto tipo, pari a 0,1482°, testimonia una ridotta variabilità tra le misure, a conferma dell'accuratezza e ripetibilità sia del metodo di calcolo sia delle acquisizioni metrologiche. Questi risultati supportano la solidità della procedura adottata per l'analisi delle superfici e la coerenza tra la ricostruzione digitale e le misure fisiche di riferimento.

Una verifica di assenza di errori sistematici è stata effettuata tra la misura dell'angolo basata sul risultato dello stitching e quella ottenuta mediante CMM.

A tal fine è stato eseguito un **test di ipotesi sulla media**, che consente di verificare se la media delle misure acquisite tramite stitching può essere considerata uguale alla media delle misure ottenute con la CMM, entro la normale variabilità sperimentale.

Le misurazioni angolari ottenute mediante CMM (considerate come riferimento) sono riportate in *Figura 48*. Sulla base di tali osservazioni si ottengono le seguenti statistiche campionarie:

$$\bar{x}_{\text{CMM}} = 55,5226^\circ \text{ e } s_{\text{CMM}} = 0.1482$$

La misura ottenuta, come spiegato nel paragrafo precedente, con la tecnica di stitching è invece pari a:

$$x_{\text{stitch}} = 55.3221^\circ$$

Il test statistico è stato eseguito con un **livello di significatività $\alpha = 0,05$** , valore comunemente adottato in ambito sperimentale. Questo parametro rappresenta la probabilità di commettere un errore di primo tipo, ossia di concludere che esiste una differenza tra i due metodi di misura quando in realtà non c'è.

Allo stesso tempo, tale valore consente di mantenere un buon potere statistico, cioè la capacità del test di individuare una differenza reale qualora esista.

Scegliere $\alpha = 0,05$ equivale ad accettare un livello di **confidenza del 95%**, sufficiente per stabilire se la differenza tra l'angolo ottenuto con la tecnica di stitching e quello misurato con la CMM sia dovuta a **fluttuazioni casuali** o rappresenti una **discrepanza statisticamente significativa** tra i due metodi di misura.

Poiché il valore di riferimento (CMM) è considerato una stima della vera media μ , si imposta un test a un campione per verificare se la misura ottenuta con stitching sia coerente con tale valore.

Le ipotesi statistiche sono le seguenti:

$$\begin{cases} H_0: \mu_{\text{stitch}} = \mu_{\text{CMM}} & \text{(la tecnica di stitching fornisce risultati equivalenti alla CMM)} \\ H_1: \mu_{\text{stitch}} \neq \mu_{\text{CMM}} & \text{(la tecnica di stitching fornisce risultati diversi)} \end{cases}$$

Si calcola la statistica t:

$$t_{\text{oss}} = \frac{x_{\text{stitch}} - \bar{x}}{s/\sqrt{n}} = \frac{55.3221 - 55.5226}{0.1482/\sqrt{3}} \approx -2.346.$$

Il numero di **gradi di libertà** associato al test è:

$$df = n - 1 = 2$$

Considerando un test bilaterale con 2 gradi di libertà, si ottiene una statistica osservata pari a $t_{\text{oss}} \approx -2,346$ con un p-value bilaterale di circa 0,1435.

Questo valore del *p-value* indica che la probabilità di osservare una differenza uguale o più estrema di quella riscontrata, se l'ipotesi nulla fosse vera, è pari al 14,35%. Poiché tale probabilità è superiore al livello di significatività $\alpha = 0,05$, non emergono evidenze sufficienti per rifiutare l'ipotesi nulla.

$$p\text{-value} \approx 0.1435 > \alpha = 0.05, \text{ non si rifiuta } H_0$$

Si può quindi stabilire che le misure ottenute con la tecnica di stitching risultano statisticamente compatibili con quelle della CMM.

In modo equivalente, confrontando il valore assoluto della statistica osservata con il valore critico del test, si ottiene: $t_{0.025,2} \approx 4.303$ e $|t_{\text{oss}}| = 2.346 < 4.303$.

Pertanto, **l'ipotesi nulla non viene rifiutata**, confermando che le differenze osservate tra le due serie di misure non sono statisticamente significative al livello di confidenza del 95%.

A complemento dell'analisi, è stato calcolato l'intervallo di confidenza al 95% per media della CMM:

$$\bar{x} \pm t_{0.025,2} \cdot SE = 55.5226 \pm 4.303 \cdot 0.0855 \approx (55.155^\circ, 55.890^\circ)$$

Il valore ottenuto con lo stitching 55.3221° ricade chiaramente all'interno di tale intervallo.

Pertanto, si può argomentare, con rigore statistico, che i risultati ottenuti con la tecnica di stitching sono buoni per il caso esaminato. Infatti, eseguendo un t-test a un campione sulle misurazioni CMM ($n = 3, \bar{x} = 55.5226^\circ, s = 0.1482^\circ$), il valore ottenuto mediante stitching (**55.3221°**) risulta compatibile con la media CMM ($t_{\text{oss}} = -2.346, p \approx 0.1435$).

Inoltre, il valore di stitching ricade nell'intervallo di confidenza al 95% della media CMM ($55.155^\circ, 55.890^\circ$). Quindi, non si riscontrano evidenze statistiche di una differenza significativa tra le due tecniche e, alla luce dei dati raccolti, i risultati di stitching possono essere considerati coerenti con le misure della CMM.

Capitolo 5

Discussione generale

5.1 Interpretazione dei Risultati

Nella metrologia delle superfici a forma libera, la specifica e la verifica delle tolleranze geometriche si basano generalmente sul confronto tra il modello CAD nominale (oppure una nuvola di punti misurata di riferimento) e la nuvola di punti acquisita sperimentalmente. Questo approccio consente di valutare la deviazione locale della superficie reale rispetto al modello di riferimento, ma comporta diverse criticità legate alla strategia di misura e alla gestione dei dati acquisiti. In particolare, la necessità di registrare più viste per coprire l'intera superficie introduce problemi di allineamento, fusione delle nuvole di punti, filtraggio del rumore e valutazione dell'errore complessivo, che incidono direttamente sull'affidabilità del risultato finale.

L'algoritmo sviluppato affronta direttamente tali problematiche, introducendo una procedura di registrazione basata su ottimizzazione bayesiana informata dall'incertezza di misura. Le prove sperimentali, condotte su forme semplici e superfici freeform, hanno dimostrato che **l'algoritmo funziona correttamente** in un ampio spettro di configurazioni, garantendo **convergenza stabile** anche in condizioni di incompletezza dei dati o di geometria complessa.

Dal punto di vista quantitativo, l'algoritmo ha fornito valori medi di RMSE inferiori alla deviazione quadratica media (S_q) della topografia locale, dei diversi casi studio, indicando che gli errori di registrazione risultano inferiori alla rugosità della superficie. Questo dato conferma che l'errore introdotto dal processo di allineamento è trascurabile rispetto alle variazioni proprie del pezzo e non compromette la fedeltà della ricostruzione [17] [4].

5.1.2. Incertezza, errori e riferibilità

L'analisi dei componenti a forma libera non può prescindere dalla comprensione delle fonti di errore e dall'individuazione dei fattori che influenzano l'incertezza di misura. Come evidenziato in precedenza, errori dovuti a deformazioni del pezzo, compensazioni errate del raggio della sonda, caratteristiche superficiali complesse o limitazioni dei sistemi ottici e software possono avere un impatto significativo sulla precisione delle misurazioni. La gestione di tali incertezze richiede procedure mirate di calibrazione, utilizzo di artefatti e pezzi di lavoro calibrati, strategie di misura multiple e, nei casi più avanzati, simulazioni al computer del processo di misura.

La riferibilità delle misure, fondamentale per garantire confrontabilità e conformità agli standard, si basa sulla capacità di collegare i risultati ottenuti a riferimenti noti attraverso artefatti calibrati e procedure di sostituzione.

L'integrazione di queste metodologie consente di quantificare l'incertezza residua, ridurre gli errori sistematici e migliorare la fiducia nei dati acquisiti.

L'approfondimento delle **fonti di errore**, l'adozione di **strategie di calibrazione** specifiche e la definizione di procedure per stabilire la **riferibilità** rappresentano la base per affrontare in modo sistematico le sfide metrologiche associate alle superfici freeform, fornendo un quadro robusto per la valutazione della qualità e la gestione dei dati in applicazioni industriali molto complesse.

5.2 Vantaggi e Limiti

Il confronto con i metodi classici, come l'ICP (Iterative Closest Point), evidenzia diversi vantaggi del metodo proposto. In primo luogo, l'ottimizzazione bayesiana riduce in modo significativo il rischio di convergenza verso minimi locali, una criticità tipica di ICP soprattutto quando le nuvole presentano pochi dettagli o quando l'inizializzazione non è vicina alla soluzione corretta. Inoltre, il metodo non si limita a cercare la trasformazione che minimizza l'errore, ma integra a priori le incertezze sul posizionamento del sistema (ad esempio il cobot), vincolando la ricerca in uno spazio dei parametri realistico. Questo approccio consente una maggiore robustezza e offre risultati più stabili anche su superfici freeform, dove mancano riferimenti geometrici evidenti. Un ulteriore vantaggio è la **generalizzabilità** del metodo, non legato ad uno specifico strumento di misura o configurazione sperimentale, ma adattabile a diversi scenari di acquisizione.

D'altra parte, però, non mancano i limiti.

L'ottimizzazione bayesiana è dal punto di vista computazionale più onerosa rispetto a l'ICP e, quando si lavora con dataset molto densi, i tempi di calcolo possono diventare significativi. Senza strategie di downsampling mirato o l'impiego di risorse hardware avanzate (GPU, calcolo parallelo), l'elaborazione può rallentare.

Un secondo limite riguarda la dipendenza dal grado di sovrapposizione tra i campi visivi. Il metodo necessita comunque di un overlap minimo per funzionare in modo affidabile. In scenari industriali meno controllati, dove le acquisizioni possono essere incomplete o non ottimizzate, questo requisito potrebbe rappresentare una criticità.

Infine, la gestione dei parametri dell'ottimizzazione richiede una calibrazione iniziale accurata. L'utilizzo di valori troppo ampi rischia di allungare i tempi di convergenza, mentre quello di valori troppo stretti può limitare la capacità del metodo di intercettare deviazioni significative.

5.3. Confronto con lo Stato dell'Arte

Nel panorama delle metodologie sviluppate, il metodo proposto si colloca come un ponte tra approcci tradizionali basati su registrazioni deterministiche e approcci più recenti, orientati alla gestione dell'incertezza e alla robustezza statistica.

Rispetto ai metodi classici, come l'ICP, che operano in modo puramente geometrico e locale, l'introduzione dell'ottimizzazione bayesiana consente non solo di automatizzare e rendere più affidabile il processo di allineamento, ma anche di integrare direttamente le incertezze del sistema.

Questo passaggio è importante perché fornisce un quadro quantitativo per la stima dell'incertezza residua, elemento chiave per la riferibilità metrologica e per il confronto con standard internazionali.

Guardando al futuro, l'applicazione di tecniche di ottimizzazione bayesiana applicate alle nuvole di punti può contribuire in modo diretto al miglioramento della qualità nelle applicazioni industriali.

Alcuni esempi concreti includono:

- **Controllo dimensionale in linea di produzione:** poter verificare le misure dei componenti senza interrompere il ciclo produttivo è fondamentale. Infatti, per ottenere misurazioni complete, spesso si eseguono più acquisizioni da angolazioni diverse tramite sensori ottici, scanner 3D o telecamere ad alta risoluzione. La colocalizzazione robusta consente di allineare queste scansioni in un unico sistema di riferimento, correggendo piccoli errori dovuti alla posizione dei sensori o a vibrazioni della linea. Poter gestire l'incertezza associata a ciascun punto di misura permette di distinguere tra deviazioni reali ed errori dei sensori, consentendo di segnalare immediatamente eventuali anomalie dimensionali. Ad esempio, in una linea di produzione di componenti meccanici, tre scanner possono catturare lo stesso pezzo da angolazioni diverse; grazie ad un algoritmo che combina le scansioni e corregge i disallineamenti, si ottiene una mappa tridimensionale precisa che evidenzia subito eventuali deviazioni dalle tolleranze nominali, riducendo scarti e tempi di controllo manuale.
- **Ispezione automatizzata di superfici complesse:** nei settori aerospaziale o automobilistico, le tolleranze sono estremamente strette e le forme freeform possono generare falsi difetti se le scansioni non sono correttamente allineate. La colocalizzazione robusta permette di combinare più acquisizioni senza introdurre distorsioni, creando una rappresentazione geometrica coerente e completa della superficie. La gestione dell'incertezza consente di correggere o ignorare punti con bassa affidabilità, come bordi sottili o superfici riflettenti, riducendo falsi allarmi e accelerando la certificazione della conformità del pezzo. Un esempio concreto è quello delle pale per turbine o dei componenti aeronautici: ogni pala viene scansionata da molteplici angolazioni, le scansioni vengono allineate generando una mappa tridimensionale precisa in grado di confrontare rapidamente la geometria reale con quella nominale, senza interventi manuali e senza ritardi nella produzione.
- **Reverse engineering:** la ricostruzione digitale di componenti non più disponibili a catalogo richiede una grande attenzione all'allineamento delle scansioni e alla gestione dell'incertezza. Una

colocalizzazione precisa assicura che tutte le scansioni siano integrate in un unico modello, evitando che anche piccoli errori possano generare modelli CAD inaccurati. L'analisi dell'incertezza permette di individuare le zone meno affidabili, come superfici lucide o bordi sottili, e di correggere i dati o aggiungere margini di sicurezza, migliorando così la fedeltà della copia digitale. Ad esempio, un'azienda che deve riprodurre un componente meccanico può eseguire più scansioni da diverse angolazioni; un algoritmo sofisticato allinea i dati, stima le incertezze nei punti critici e produce un modello CAD completo e affidabile, pronto per essere lavorato o stampato in 3D. In questo modo, la nuova parte mantiene le stesse caratteristiche funzionali dell'originale, riducendo così il rischio di errori e malfunzionamenti.

In questo contesto si inserisce in modo naturale il concetto di **digital twin**, ossia la rappresentazione virtuale di un componente, di un sistema o di un intero impianto, costruita in modo tale da replicarne fedelmente comportamento, geometria e stato operativo. La creazione di un gemello digitale realmente utile richiede molti aspetti: è necessario disporre di **dati geometrici ad altissima fedeltà**, acquisiti in modo continuo e costantemente aggiornati, in grado di riflettere anche le più piccole variazioni della geometria reale dovute a deformazioni, usura o stress meccanico. Senza un'integrazione accurata dei dati reali, il gemello digitale rischierebbe di diventare una rappresentazione statica, incapace di supportare decisioni operative o manutentive. Come illustrato in *Figura 49*, sensori fisici come trasduttori di pressione, sensori di temperatura e barre di fusione raccolgono informazioni precise sul componente reale, che vengono poi trasferite e integrate nel modello digitale per simulazioni e analisi.

A questo punto assumono particolare importanza le tecniche di **colocalizzazione robusta** e **gestione dell'incertezza**, tecniche viste applicate nel controllo dimensionale, nell'ispezione di superfici complesse e nel *reverse engineering*. Algoritmi avanzati di fusione dei dati permettono di combinare acquisizioni multiple provenienti da sensori diversi, correggendo micro-scatti, disallineamenti e piccole deformazioni che possono emergere durante il ciclo di vita del componente. Inoltre, la gestione dell'incertezza consente di associare a ciascun punto una misura di affidabilità, distinguendo in modo chiaro le variazioni reali della geometria e errori introdotti dai sensori, dalle condizioni ambientali o dalle procedure di acquisizione. Grazie a queste tecniche, il digital twin può restare costantemente sincronizzato con la realtà fisica, capace di rappresentare con precisione ogni cambiamento o usura progressiva.

La precisione e l'affidabilità del gemello digitale portano a vantaggi concreti in tutte le fasi del ciclo di vita del prodotto. In termini di **manutenzione predittiva**, un digital twin accurato permette di monitorare in tempo reale lo stato di componenti critici come pale di turbine, utensili o elementi meccanici sottoposti a stress ciclico. L'analisi delle deformazioni progressive, dell'usura superficiale o di piccoli difetti nascosti consente di pianificare interventi mirati prima che si verifichi un guasto, aumentando la sicurezza operativa e riducendo i fermi macchina imprevisti.

Allo stesso tempo, la disponibilità di geometrie aggiornate ed estremamente precise migliora notevolmente l'affidabilità delle **simulazioni ingegneristiche**. I modelli FEM (Finite Element Method) o CFD (Computational Fluid Dynamics)⁶, se alimentati con dati accurati e aggiornati, forniscono previsioni più affidabili sul comportamento strutturale o fluidodinamico del componente. Ciò permette di identificare possibili criticità, ottimizzare le prestazioni e intervenire preventivamente su aspetti come deformazioni, vibrazioni o flussi anomali, con un impatto diretto sulla progettazione e sull'efficienza operativa.

Un ulteriore beneficio è la **riduzione dei costi di non qualità**, che deriva dalla possibilità di effettuare una riferibilità metrologica molto più dettagliata e precisa. Un digital twin sincronizzato con la realtà consente di individuare scarti, deviazioni dimensionali o difetti prima che diventino problemi concreti, riducendo rilavorazioni, scarti e interventi correttivi costosi. Questo si traduce in un miglioramento evidente della produttività, con tempi di produzione più rapidi e costi complessivi inferiori.

Il digital twin non rappresenta semplicemente un modello virtuale, ma una vera e propria **estensione digitale della realtà fisica**, resa possibile grazie a tecniche avanzate di fusione dei dati e gestione dell'incertezza. L'effetto complessivo è un miglioramento significativo dell'efficienza, della qualità, della sicurezza e della capacità predittiva lungo l'intero ciclo di vita del prodotto, trasformando il digital twin in uno strumento operativo strategico e non più solo in un semplice modello di supporto alla progettazione.

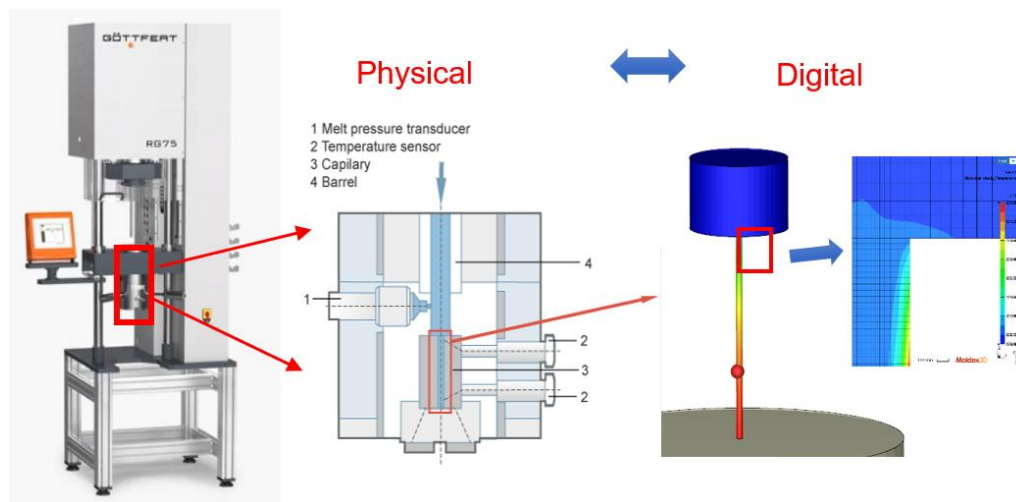


Figura 49: Schema concettuale di un gemello digitale per la progettazione di uno strumento e la misurazione delle proprietà dei materiali.

5.3.2. Innovazione nella metrologia Industriale: Algoritmi Auto-Adattivi e Sistemi di Misura Intelligenti

Un aspetto particolarmente interessante riguarda il collegamento con le strategie emergenti di **machine learning**: l'ottimizzazione bayesiana può essere vista come un "ponte" verso algoritmi di intelligenza artificiale che imparano progressivamente a riconoscere pattern geometrici e ad adattare i parametri di allineamento. In prospettiva, si potrebbe arrivare ad algoritmi "auto-adattivi", capaci di migliorare le

⁶ FEM e CFD sono strumenti di simulazione che, usando dati geometrici precisi, permettono di prevedere con accuratezza il comportamento fisico del sistema.

prestazioni in base all'esperienza accumulata, riducendo la necessità di calibrazione manuale, nonché di operare efficacemente in ambienti non strutturati. La metodologia proposta si colloca nel cuore delle sfide moderne dell'industria 4.0: garantire qualità e affidabilità delle misure anche in condizioni complesse, alimentando processi digitali avanzati, come quelli basati sul digital twin e aprendo la strada a sistemi di controllo sempre più intelligenti e predittivi.

I risultati ottenuti confermano che l'integrazione tra **machine learning** e **registrazione tradizionale** non solo migliora significativamente l'affidabilità e la ripetibilità delle misure, ma rappresenta anche un passo importante verso la realizzazione di sistemi di misura tridimensionali autonomi e altamente precisi, capaci di adattarsi a componenti con geometrie complesse e di operare efficacemente in contesti industriali reali.

Le metodologie sviluppate - dall'ottimizzazione dei processi di registrazione allo stitching intelligente delle superfici, passando per la gestione sistematica dell'incertezza di posizionamento- e le soluzioni implementate costituiscono oggi una base solida e versatile per la creazione di sistemi di controllo qualità avanzati.

L'impatto potenziale di queste soluzioni va oltre la singola linea di produzione: possono contribuire a **ridefinire gli standard industriali di precisione, affidabilità e automazione**, supportando la standardizzazione della **metrologia ottica a livello europeo e internazionale**.

In particolare, l'approccio integrato proposto apre la strada a framework metrologici in cui sensori avanzati, algoritmi di machine learning e robotica collaborativa lavorano in sinergia, creando **un ecosistema di misura intelligente** capace di rispondere alle esigenze crescenti di componenti sempre più complessi e processi produttivi più esigenti.

In prospettiva futura, questo lavoro può evolversi verso sistemi di **diagnostica predittiva**, in cui le informazioni raccolte durante la misura non solo qualificano i componenti, ma anticipano anomalie e guidano interventi correttivi automatici, integrando così la metrologia direttamente nel ciclo decisionale industriale.

Tale evoluzione rappresenta un passo decisivo verso una produzione più efficiente, affidabile e sostenibile, ponendo le basi per una nuova generazione di **industrie intelligenti**, dove precisione, automazione e innovazione scientifica convergono per ridefinire i confini della misura tridimensionale.

Capitolo 6

Conclusioni

La metrologia, pilastro essenziale per garantire qualità e affidabilità nei processi produttivi, sta affrontando una trasformazione profonda, spinta dall'integrazione di tecnologie digitali, robotica collaborativa e intelligenza artificiale. Le moderne esigenze industriali — caratterizzate da componenti con geometrie freeform, tolleranze dimensionali sempre più strette e richieste di caratterizzazione superficiale fino a scale micrometriche e sub-micrometriche — stanno rendendo insufficienti gli approcci tradizionali, spesso lenti, manuali e difficilmente scalabili. Una delle sfide più rilevanti consiste proprio nel combinare, in maniera integrata, misure dimensionali ad alta precisione e misurazioni di superficie ad alta risoluzione su forme complesse, garantendo allo stesso tempo continuità metrologica e ripetibilità.

In questo contesto emergono metodologie avanzate basate su metrologia virtuale e gemelli digitali, affiancate da algoritmi di ottimizzazione e tecniche di fusione dati metrologicamente informate. Tra queste, lo stitching accurato di campi di misura provenienti da sensori ottici differenti riveste un ruolo centrale per la ricostruzione completa di superfici freeform estese e complesse. L'impiego di algoritmi, come quelli di ottimizzazione bayesiana, permette di affrontare in modo efficiente problemi di allineamento non lineare in presenza di incertezze, sfruttando informazioni a priori sulle prestazioni del sistema di misura.

In questa direzione si inserisce il contributo della presente tesi, che sviluppa un algoritmo di stitching per nuvole di punti integrando tecniche di ottimizzazione bayesiana con conoscenze metrologiche relative alla cinematica e all'incertezza del sistema robotico. Tale approccio consente di ridurre l'incertezza di allineamento e di garantire coerenza geometrica nella ricostruzione di superfici freeform.

La metodologia è stata validata sia su dati sintetici, in condizioni controllate, sia su dati sperimentali acquisiti su componenti di complessità crescente mediante un sistema cobot-sensore ottico. In entrambi i casi non sono stati rilevati errori sistematici significativi, confermando la robustezza e la capacità del metodo di supportare applicazioni metrologiche reali.

Parallelamente, l'adozione di tecnologie digitali come IoT, cloud computing e blockchain sta favorendo la creazione di infrastrutture metrologiche distribuite e interoperabili, in cui certificati digitali di calibrazione e modelli 3D ricostruiti possono essere verificati, certificati e integrati nel ciclo produttivo.

Nonostante questi progressi, restano aperte importanti sfide: sviluppare algoritmi sempre più robusti, spiegabili e accurati; garantire la qualità dei dati provenienti da reti sensoriali distribuite; e costruire un'infrastruttura metrologica digitale globale. In tale scenario, l'integrazione tra **metrologia, robotica collaborativa e machine learning** rappresenta un passaggio fondamentale verso sistemi di misura automatici e scalabili, e la metodologia proposta in questa tesi costituisce un passo concreto in questa direzione, contribuendo alla transizione verso una metrologia realmente digitale e pronta per i futuri sistemi produttivi intelligenti.

In conclusione, l'integrazione di algoritmi di ottimizzazione, come quelli per l'elaborazione di nuvole di punti, di sistemi digitali e di tecnologie avanzate rappresenta una rivoluzione per la metrologia, trasformandola in un elemento centrale per la **smart manufacturing**. Quest'ultima, intesa come la nuova frontiera della produzione industriale basata sulla digitalizzazione, sull'interconnessione dei sistemi e sull'analisi intelligente dei dati, mira a rendere i processi produttivi più **efficienti, precisi e flessibili**.

In questo contesto, la metrologia digitale assume un ruolo strategico, poiché consente di integrare le misurazioni direttamente nel ciclo produttivo, fornendo dati in tempo reale per il **controllo di qualità**, la **correzione immediata degli errori** e l'**ottimizzazione continua dei processi**.

Questa evoluzione non solo migliorerà l'efficienza e la precisione dei processi, ma contribuirà anche a costruire un'infrastruttura metrologica più resiliente, innovativa e orientata al futuro.

La strada verso una metrologia completamente digitalizzata è ormai avviata, e il suo successo dipenderà dalla capacità di combinare innovazione tecnologica, come lo sviluppo di algoritmi sempre più sofisticati, collaborazione globale e visione strategica [18].

Bibliografia

- [1] E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt. Metrology of freeform shaped parts. 2007.
- [2] Yifan Zhao, Yinbao Cheng, Quanyong Xu, Zai Luo, Xueying Wang and Hongli Li. Uncertainty modeling and evaluation of profile measurement by structured light scanner (2022).
- [3] BIPM, JCGM. (2012). International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).
- [4] Schmitt, R., Peterek, M., Morse, E., Knapp, W., Galetto, M., Härtig, F., Goch, G., Hughes, B., Forbes, A., Estler, T., Trapet, E., Wäldele, F., & Weckenmann, A. (2016). Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. CIRP Annals.
- [5] Richard Leach, Danny Sims-Waterhouse, Fabrizio Medeossib, Enrico Savio, Simone Carmignato, Rong Su. Fusion of photogrammetry and coherence scanning interferometry data for all-optical coordinate measurement (2018).
- [6] A. Weckenmann, X. Jiang , K.-D. Sommer, U. Neuschaefer-Rubec, J. Seewig, L. Shawa, T. Estler. Multisensor data fusion in dimensional metrology. , [Online].
- [7] «https://www.open3d.org/docs/0.7.0/tutorial/Basic/icp_registration.html,» [Online].
- [8] Sumit Kumar, Zhen Tong* and Xiangqian Jiang. Advances in the design and manufacturing of novel freeform optics (2022).
- [9] Giacomo Maculotti, Gianfranco Genta, Khurshid Aliev, Maurizio Galetto. Metrological integration and automation of surface topography measuring.
- [10] Giacomo Maculotti, Nicola Senin, Olusola Oyelola, Maurizio Galetto, Adam Clare, Richard Leach. Multi-sensor data fusion for the characterisation of laser cladded cermet coatings.
- [11] «INRIM GitHub Repository: <https://github.com/INRIM/surfile>,» INRIM, 2023. [Online].
- [12] «Giura, A., Zucco, M., & Ribotta, L. (2024). SurfFILE: An Open-Source Python Package for Surface Topography Analysis. Metrology, 4(4), 695-717. <https://doi.org/10.3390/metrology4040041>,» [Online].
- [13] G.H. White, I. Farrance. Uncertainty of Measurement Working Group (2004).
- [14] Lou, S., Zeng, WH., Jiang, XQ. et al. Tecniche di filtrazione robuste in metrologia geometrica e loro confronto. Int. J. Autom. Comput., (2013).
- [15] «https://scikit-optimize.github.io/stable/auto_examples/bayesian-optimization.html,» [Online].
- [16] <https://dormerpramet.com/uk-ie/it/p/7455489>, [Online].
- [17] Yiu, K. F. C., & Tam, H. Y. (2007). Computer controlled optical surfacing (CCOS) for aspheric and freeform optics. Applied Optics.
- [18] Carlos Roberto H. Barbosa , Manuel C. Sousa, Maria Fatima L. Almeida * and Rodrigo F. Calili. Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research Agenda.

- [19] «<https://metrology.news/beyond-the-cmm-the-future-of-optical-measurement-in-manufacturing/>,»
[Online].
- [20] Förstner, W., & Wrobel, B. (2016). Photogrammetric Computer Vision. Springer.

APPENDICE

Caso 1: Incisione "4"

```
import numpy as np
import open3d as o3d
from skopt import gp_minimize
from skopt.space import Real
from skopt.plots import plot_convergence
from scipy.spatial.transform import Rotation as R
from scipy.spatial import cKDTree
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import time
```

```
N_CALLS_OPTIMIZATION = 40
```

```
DEBUG = 0
```

```
initime = time.time_ns()
```

```
def msgtime(msg):
    print(f"{{time.time_ns() - initime}}*1e-9:7.3f} {msg}")
```

LETTURA FILE

```
def leggi_e_pulisci(file_input):
    punti = []
    with open(file_input, 'r') as fin:
        msgtime(f"Elaborazione file {file_input}")
        xx = 0
        for riga in fin:
            xx += 1
            if xx <= 0: #tutto il dataset
                continue
            xx = 0
            riga = riga.strip()
            if not riga or '***' in riga:
                continue
            try:
                x, y, z = map(float, riga.split())
                z /= 1000 # converti z in mm
                punti.append([x, y, z])
                if DEBUG and len(punti) == DEBUG:
                    break
            except ValueError:
                continue
    return np.array(punti)

def leggi_posizioni_rotazioni_robot(file_robot, angoli_in_gradi=True):
    posizioni, rotazioni = [], []
    with open(file_robot, "r") as f:
        f.readline()
        for riga in f:
            riga = riga[3:].strip().replace(',', ' ')
            try:
                valori = list(map(float, riga.split()))
                if len(valori) != 6:
                    continue
                x, y, z, rx, ry, rz = valori
```

```

        posizioni.append(np.array([x, y, z]))
        rotazioni.append(R.from_euler('xyz', [rx, ry, rz], degrees=angoli_in_gradi))
    except ValueError:
        continue
    return posizioni, rotazioni

def make_o3d_cloud(points, color=None):
    pc = o3d.geometry.PointCloud()
    pc.points = o3d.utility.Vector3dVector(points)
    if color is not None:
        pc.paint_uniform_color(color)
    return pc

# solo per visualizzazione
def enfatizza_z(points, fattore=5.0):
    pts_mod = points.copy()
    pts_mod[:, 2] *= fattore
    return pts_mod

def crea_frame(size=5.0):
    return o3d.geometry.TriangleMesh.create_coordinate_frame(size=size)

# TRASFORMAZIONI
def apply_transform(params, points):
    rx, ry, rz, tx, ty, tz = params
    Rmat = R.from_euler('xyz', np.radians([rx, ry, rz])).as_matrix()
    T = np.eye(4)
    T[:3, :3] = Rmat
    T[:3, 3] = [tx, ty, tz]
    pts_h = np.hstack([points, np.ones((points.shape[0], 1))])
    return (T @ pts_h.T).T[:, :3]

# RMSE lungo la direzione di movimento
def calculate_rmse_along_motion(fixed_points, transformed_points, raggio=1): #raggio= 1mm--> 0,985
    fixed_center = np.mean(fixed_points, axis=0)
    moving_center = np.mean(transformed_points, axis=0)

    # direzione movimento
    moving_dir = moving_center - fixed_center
    norm = np.linalg.norm(moving_dir)
    if norm == 0:
        moving_dir = np.array([1.0, 0.0, 0.0])
    else:
        moving_dir /= norm

    # filtra punti entro raggio
    dist_fixed = (fixed_points - fixed_center) @ moving_dir
    fixed_subset = fixed_points[np.abs(dist_fixed) <= raggio]

    dist_moving = (transformed_points - moving_center) @ moving_dir
    moving_subset = transformed_points[np.abs(dist_moving) <= raggio]

    if len(fixed_subset) == 0 or len(moving_subset) == 0:
        return float('inf')

    fixed_tree = cKDTree(fixed_subset)
    moving_tree = cKDTree(moving_subset)

```

```

dist_f2m, idx_f2m = moving_tree.query(fixed_subset, k=1, workers= -1)
dist_m2f, idx_m2f = fixed_tree.query(moving_subset, k=1, workers= -1)

mask = (np.arange(len(fixed_subset)) == idx_m2f[idx_f2m])
if not np.any(mask):
    return float('inf')

diffs = fixed_subset[mask] - moving_subset[idx_f2m[mask]]
rmse = np.sqrt(np.mean(np.sum(diffs**2, axis=1)))
return rmse

# OTTIMIZZAZIONE
def optimize_alignment(fixed_points, moving_points, t_nom=[0,0,0,0,0,0], n_calls=40, raggio=1, plot=True):
    U_tx, U_ty, U_tz = 0.0552, 0.0606, 0.0693 # mm
    U_theta = 0.001 # gradi

    def objective(params):
        transformed = apply_transform(params, moving_points)
        return calculate_rmse_along_motion(fixed_points, transformed, raggio)

    search_space = [
        Real(t_nom[0]-U_theta, t_nom[0]+U_theta),
        Real(t_nom[1]-U_theta, t_nom[1]+U_theta),
        Real(t_nom[2]-U_theta, t_nom[2]+U_theta),
        Real(t_nom[3]-U_tx, t_nom[3]+U_tx),
        Real(t_nom[4]-U_ty, t_nom[4]+U_ty),
        Real(t_nom[5]-U_tz, t_nom[5]+U_tz)]
    # Utilizza t_nom come punto di partenza (x0) se non è il default [0,0,0,0,0,0]
    res = gp_minimize(objective, search_space, x0=t_nom, n_calls=n_calls, random_state=42)

    if plot:
        plt.figure(figsize=(8,5))
        plot_convergence(res)
        plt.title("Convergenza RMSE")
        plt.xlabel("Numero di chiamate")
        plt.ylabel("RMSE minimo (mm)")
        plt.grid(True)
        plt.show()

    aligned_points = apply_transform(res.x, moving_points)
    return aligned_points, res.x, float(res.fun)

# FUSIONE
def merge_and_downsample(points1, points2, voxel_size=0.001):
    combined = np.vstack([points1, points2])
    pc = make_o3d_cloud(combined)
    pc_down = pc.voxel_down_sample(voxel_size=voxel_size)
    return np.asarray(pc_down.points)

def stampa_parametri(step, params, cost):
    rx, ry, rz, tx, ty, tz = params
    print(f"\n=== {step} ===")
    print(f"Rotazioni: RX={rx:.6f}° RY={ry:.6f}° RZ={rz:.6f}°")
    print(f"Traslazioni: TX={tx:.6f} TY={ty:.6f} TZ={tz:.6f} mm")
    print(f"RMSE: {cost:.6f} mm")
    print(f"=====")

```



```

# MAIN
msgtime("Avvio...")
input_dir = "Dataset CORRETTO"
files_input = [os.path.join(input_dir, f"mark4_0{i}.txt") for i in range(1,5)]
file_robot = os.path.join(input_dir, "mark4.txt")

# Carica nuvole
topographies = [leggi_e_pulisci(f) for f in files_input]

# Rimuove outlier
topographies_clean = []
for pts in topographies:
    pc = make_o3d_cloud(pts)
    pc, _ = pc.remove_statistical_outlier(nb_neighbors=40, std_ratio=3.0)
    topographies_clean.append(np.asarray(pc.points))
topographies = topographies_clean

# Carica pose robot
posizioni_robot, rotazioni_robot = leggi_posizioni_rotazioni_robot(file_robot)

# Trasforma tutte le nuvole nel frame della prima scansione
T1 = np.eye(4)
T1[:3,:3] = rotazioni_robot[0].as_matrix()
T1[:3,3] = posizioni_robot[0]
T1_inv = np.linalg.inv(T1)

topographies_T = []
for pts, rot, trasl in zip(topographies, rotazioni_robot, posizioni_robot):
    Ti = np.eye(4)
    Ti[:3,:3] = rot.as_matrix()
    Ti[:3,3] = trasl
    T_rel = T1_inv @ Ti
    pts_h = np.hstack([pts, np.ones((pts.shape[0],1))])
    pts_T = (T_rel @ pts_h.T).T[:, :3]
    topographies_T.append(pts_T)

params_prev = [0, 0, 0, 0, 0, 0] # nessun bias iniziale
# Allineamento step-by-step
fixed_ref = topographies_T[0]
for i in range(1, len(topographies_T)):
    q = topographies_T[i]

    aligned, params, cost = optimize_alignment(fixed_ref, q, raggio=1, n_calls=N_CALLS_OPTIMIZATION,
t_nom=params_prev)
    stampa_parametri(f"ALLINEAMENTO {i}", params, cost)
    # Fusione della nuvola allineata con la nuvola di riferimento composita.
    fixed_ref = merge_and_downsample(fixed_ref, aligned)
    # aggiorna bias per il prossimo step
    params_prev = params

# Salvataggio finale
np.savetxt("nuvola_finale_bayesiana_pura.txt", fixed_ref, fmt="%.6f")
msgtime("Nuvola finale salvata in 'nuvola_finale_bayesiana_pura.txt'")
msgtime("Elaborazione completata")
#Visualizzazione finale
o3d.visualization.draw_geometries([make_o3d_cloud(enfatizza_z(fixed_ref,5), [0.7,0.7,0.7]),
    crea_frame()], window_name=f"Dopo Allineamento {i}", width=1024, height=768)

```

Codice ICP

```
import numpy as np
import open3d as o3d
import os
import copy
import time

# Funzioni di supporto
def msgtime(msg, start_time):
    print(f"{{time.time() - start_time:.3f}} s: {msg}")

def leggi_punti(file_input, skip_lines=0):
    """Legge un file di punti, saltando righe iniziali o commenti"""
    punti = []
    with open(file_input, 'r') as f:
        for i, riga in enumerate(f):
            if i < skip_lines:
                continue
            riga = riga.strip()
            if not riga or '****' in riga:
                continue
            try:
                x, y, z = map(float, riga.split())
                z /= 1000 # micron -> mm
                punti.append([x, y, z])
            except:
                continue
    return np.array(punti)

def draw_registration(source, target, transformation):
    """Visualizza due nuvole con trasformazione applicata alla source"""
    src_temp = copy.deepcopy(source)
    tgt_temp = copy.deepcopy(target)
    src_temp.paint_uniform_color([1, 0.706, 0]) # giallo
    tgt_temp.paint_uniform_color([0, 0.651, 0.929]) # ciano
    src_temp.transform(transformation)
    o3d.visualization.draw_geometries([src_temp, tgt_temp])

# MAIN
start_time = time.time()
msgtime("Avvio...", start_time)

# Percorsi file
input_dir = "Dataset CORRETTO"
file_ref = os.path.join(input_dir, "mark4_Stitched.txt")
file_mov = os.path.join(input_dir, "nuvola_finale_bayesiana_pura.txt")

# Lettura nuvole
ref_points = leggi_punti(file_ref)
mov_points = np.loadtxt(file_mov)
msgtime(f"Ref: {{len(ref_points)}} punti, Mov: {{len(mov_points)}} punti", start_time)

# Creazione point cloud Open3D
pc_ref = o3d.geometry.PointCloud()
pc_ref.points = o3d.utility.Vector3dVector(ref_points)

pc_mov = o3d.geometry.PointCloud()
pc_mov.points = o3d.utility.Vector3dVector(mov_points)
```

Pulizia outlier statistici #k= 3

```
pc_ref = pc_ref.remove_statistical_outlier(nb_neighbors=20, std_ratio=3.0)[0]
pc_mov = pc_mov.remove_statistical_outlier(nb_neighbors=20, std_ratio=3.0)[0]
msgtime(f"Punti dopo pulizia: Ref={len(pc_ref.points)}, Mov={len(pc_mov.points)}", start_time)
```

Down-sampling per velocità

```
voxel_size = 0.001
pc_ref = pc_ref.voxel_down_sample(voxel_size)
pc_mov = pc_mov.voxel_down_sample(voxel_size)
msgtime(f"Punti dopo down-sampling: Ref={len(pc_ref.points)}, Mov={len(pc_mov.points)}", start_time)
```

Visualizzazione iniziale

```
trans_init = np.eye(4)
draw_registration(pc_mov, pc_ref, trans_init)
```

ICP point-to-point

```
threshold = 0.001 # distanza massima in mm
reg_p2p = o3d.pipelines.registration.registration_icp(
    pc_mov, pc_ref, threshold, trans_init,
    o3d.pipelines.registration.TransformationEstimationPointToPoint(),
    o3d.pipelines.registration.ICPConvergenceCriteria(max_iteration=100))
```

```
msgtime("ICP point-to-point completato", start_time)
print("RMSE:", reg_p2p.inlier_rmse)
print("Trasformazione finale:\n", reg_p2p.transformation)
```

Visualizzazione risultato finale

```
pc_mov.transform(reg_p2p.transformation)
coordinate_frame = o3d.geometry.TriangleMesh.create_coordinate_frame(size=5.0)
pc_ref.paint_uniform_color([0, 0.651, 0.929])
pc_mov.paint_uniform_color([1, 0.706, 0])
o3d.visualization.draw_geometries([pc_ref, pc_mov, coordinate_frame], window_name="Allineamento Finale Point-to-Point", width=1024, height=768)
```