

# POLITECNICO DI TORINO



DIPARTIMENTO di INGEGNERIA DELL'AMBIENTE, DEL TERRITORIO E  
DELLE INFRASTRUTTURE (DIATI)  
Corso di Laurea in Ingegneria Civile  
Tesi di Laurea Magistrale

## CREAZIONE DI MODELLI “AS BUILT” DI IMPIANTI MEDIANTE STRUMENTI A LUCE STRUTTURATA

Relatore: Prof. Ing. Marco Piras

Candidato: Gandini Gabriele

Matricola: 255474

Co-relatrice: Ing. Nives Grasso

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

## Ringraziamenti

Ringrazio il professore Marco Piras e l'ing. Nives Grasso per il contributo che hanno dato nell'aiutarmi a sviluppare la mia tesi di laurea. Ringrazio entrambi per la disponibilità dimostrata e per la loro costruttiva collaborazione

# CREAZIONE DI MODELLI “AS BUILT” DI IMPIANTI MEDIANTE STRUMENTI A LUCE STRUTTURATA

## INDICE GENERALE :

<b>Introduzione</b>	<b>I</b>
<b>Capitolo 1. Importanza del modello “as built” in ingegneria</b>	<b>pag. 1</b>
1.1 Premessa	pag. 1
1.2 Modellizzazione	pag. 1
1.3 Vantaggi del modello “as built”	pag. 2
<b>Capitolo 2. Metodologie e tecniche di rilevamento 3D</b>	<b>pag. 4</b>
2.1 Classificazione	pag. 4
2.2 Breve descrizione delle metodologie	pag. 6
2.2.1 Triangolazione	pag. 6
2.2.2 Differenza di fase	pag. 8
2.2.3 Tempo di volo	pag. 10
2.2.4 Confronto metodologie	pag. 13
2.3 Tecniche senza contatto passive	pag. 14
2.3.1 Stereoscopia e fotogrammetria	pag. 14
2.4 Tecniche senza contatto attive	pag. 18
2.4.1 Luce strutturata	pag. 18
2.4.2 Laser	pag. 19
2.5 Tecniche con contatto	pag. 21
2.5.1 CMM- Coordinate Measuring Machines	pag. 21

**Capitolo 3 Gli scanner 3D** \_\_\_\_\_ pag. 22

3.1 Premessa \_\_\_\_\_ pag. 22

3.2 Parametri caratteristici degli scanner 3D \_\_\_\_\_ pag. 22

3.3 Strumenti a luce strutturata \_\_\_\_\_ pag. 25

3.4 Laser scanner \_\_\_\_\_ pag. 26

3.5 Strumenti utilizzati nelle prove \_\_\_\_\_ pag. 30

3.5.1 Scanner Mantis Vision F6 Smart \_\_\_\_\_ pag. 30

3.5.2 FOCUS 3D Cam2 120s \_\_\_\_\_ pag. 32

**Capitolo 4 Prove eseguite: obiettivi e procedure applicate** \_\_\_\_\_ pag. 34

4.1 Software ECHO per F6 \_\_\_\_\_ pag. 38

4.2 Prova n.1 : rilievo elemento architettonico con F6 Smart. \_\_\_\_\_ pag. 41

4.2.1 Scansione della parte anteriore del fregi \_\_\_\_\_ pag. 41

4.2.2 Scansione a 360° \_\_\_\_\_ pag. 45

4.3 Prova n.2 : rilievo di un tavolo \_\_\_\_\_ pag. 47

4.3.1 Scansione con F6 Smart \_\_\_\_\_ pag. 47

4.4 Prova n.3 : rilievo di una vetrina \_\_\_\_\_ pag. 50

4.4.1 Rilievo con laser scanner FARO FOCUS 120s \_\_\_\_\_ pag. 51

4.4.2 Rilievo con luce strutturata F6 Smart \_\_\_\_\_ pag. 52

4.5 Prova n.4 : rilievo di un cilindro con luce strutturata \_\_\_\_\_ pag. 52

4.5.1 Scansione e relative problematiche \_\_\_\_\_ pag. 53

4.6 Prova n.5 : rilievo di tubazioni al primo piano \_\_\_\_\_ pag. 54

4.6.1 Scansione con F6 Smart a luce strutturata \_\_\_\_\_ pag. 55

4.7 Prova n.6 : rilievo di un corridoio al piano interrato \_\_\_\_\_ pag. 56

4.7.1 Scansione con luce strutturata \_\_\_\_\_ pag. 57

4.7.2 Scansione con laser scanner \_\_\_\_\_ pag. 58

<b>Capitolo 5. Elaborazione dati ed analisi dei risultati</b>	<b>pag. 59</b>
<b>5.1 Software di elaborazione</b>	<b>pag. 59</b>
5.1.1 CloudCompare	pag. 59
5.1.2 Matlab	pag. 59
5.1.3 3DReshaper	pag. 59
5.1.4 librerie PCL	pag. 60
5.1.5 FARO Scene	pag. 60
<b>5.2 Prova n.3: Confronto e analisi nuvole</b>	<b>pag. 61</b>
5.2.1 Registrazione delle nuvole	pag. 61
5.2.2 Calcolo e confronto distanza media tra le nuvole	pag. 64
5.2.3 Calcolo e confronto densità di superficie	pag. 67
5.2.4 Calcolo distanza nuvole in alcuni punti	pag. 70
<b>5.3 Prova n.4: Elaborazione dati e analisi risultati</b>	<b>pag. 74</b>
5.3.1 Elaborazione nuvola con CloudCompare	pag. 74
5.3.2 Elaborazione nuvola con 3DReshaper	pag. 77
5.3.3 Elaborazione nuvola con Matlab	pag. 80
5.3.4 Elaborazione nuvola con PCL e Microsoft Visual Studio	pag. 82
5.3.5 Analisi risultati	pag. 87
<b>5.4 Prova n.5: Elaborazione dati e analisi risultati</b>	<b>pag. 92</b>
5.4.1 Elaborazione nuvola con Matlab	pag. 92
5.4.2 Elaborazione nuvola con 3DReshaper	pag. 98
5.4.3 Analisi risultati	pag. 100
<b>5.5 Prova n.6: Elaborazione dati e analisi risultati</b>	<b>pag. 103</b>
5.5.1 Elaborazione delle nuvole Lidar con FARO Scene	pag. 103
5.5.2 Elaborazione delle nuvole F6 e Lidar con CloudCompare	pag. 106
5.5.3 Elaborazione della nuvola F6 con 3DReshaper	pag. 109

5.5.4 Elaborazione della nuvola F6 con Matlab	pag. 111
5.5.5 Elaborazione della nuvola F6 con PCL	pag. 113
5.5.6 Analisi risultati	pag. 117
<b>Conclusioni</b>	<b>pag. 121</b>
<b>Bibliografia e sitografia</b>	<b>pag. 123</b>
<b>Allegati</b>	<b>pag. 125</b>
All.to n. 1 Codice Matlab Funzione di Pratt	pag. 125
All.to n. 2 Codice Matlab tubo porta-progetti	pag. 127
All.to n. 3 Codice PCL tubo portaoggetti	pag. 131
All.to n. 4 Output codice PCL tubo porta-progetti	pag. 135
All.to n. 5 Tabella coordinate centro sezioni del tubo porta-progetti	pag. 143
All.to n. 6 Codice Matlab tubazioni primo piano DIATI (rimozione piani)	pag. 144
All.to n. 7 Codice Matlab tubazioni primo piano DIATI (superficie cilindrica)	pag. 147
All.to n. 8 Codice Matlab tubazioni primo piano DIATI (sezioni tubazioni)	pag. 148
All.to n. 9 Report di registrazione di FARO SCENE	pag. 155
All.to n. 10 Codice Matlab tubazioni corridoio piano interrato	pag. 157
All.to n. 11 Codice PCL tubazioni corridoio piano interrato	pag. 178
All.to n. 12 Tabelle coordinate sezioni tubazioni corridoio piano interrato	pag. 183

## Introduzione

Nelle attuali costruzioni la parte impiantistica negli edifici assume un'importanza crescente con lo scopo principale di garantire maggiore fruibilità, affidabilità e risparmio energetico. L'estensione e la complessità di tutti gli impianti necessita di rappresentazioni che permettono di costruire modelli idonei non solo per la progettazione iniziale ma per ogni successiva attività volta a garantire il mantenimento e l'adeguamento nel tempo delle prestazioni di un immobile e dei relativi impianti.

La creazione di modelli del costruito ("as built"), scopo di questa tesi, diventa parte della metodologia BIM per inserirsi nelle ultime fasi di dettaglio in cui il modello è utile per tutta la gestione successiva alla costruzione.

L'obbligatorietà della metodologia BIM e dei modelli 3D digitalizzati, attualmente relativa solo per opere complesse e rilevanti, è una recente novità nel mondo delle costruzioni: le implicazioni riguardano il coinvolgimento di adatti mezzi e strumentazione operativamente efficaci ed efficienti per ottenere dati digitalizzati per modelli "as built". Quindi operare con strumenti tecnologicamente avanzati sarà sempre più frequentemente necessario.

Al fine di creare modelli "as built" lo scopo del lavoro di tesi è relativo a rilievi 3D con strumentazione portatile a luce strutturata e successivi trattamenti delle nuvole di punti mediante software dedicati. Alcune delle prove vengono completate ed integrate con laser scanner: questo al fine di processare, comparando ed unendo, le nuvole di punti ottenute con entrambi gli strumenti. Si è sviluppata una strategia di lavoro con l'impiego di diversi software con l'obiettivo di valutare le prestazioni nel processamento delle nuvole di punti. I software utilizzati sono:

- CloudCompare, impiegato per la segmentazione, pulitura e sezionamento delle nuvole di punti acquisite. Sono state effettuate delle analisi statistiche per confrontare i modelli 3D ottenuti con tecnologia a luce strutturata e laser scanner. Le distanze tra i punti delle nuvole e le densità sono stati riportati in grafici e tabelle.
- FARO Scene, utilizzato per l'allineamento delle nuvole di punti ottenute mediante tecnologia laser scanner rispetto a un sistema di riferimento locale; questo software ha permesso di velocizzare l'operazione di allineamento rispetto a CloudCompare in particolare quando vengono acquisite diverse nuvole
- 3DReshaper, librerie PCL e script creati in Matlab per la determinazione di parametri geometrici relativi a sezioni di tubazioni appartenenti a impianti idraulici ed elettrici con lo scopo di confrontare i risultati in termini di scarto quadratico medio.

Gli strumenti a luce strutturata e i laser scanner adottano metodologie e tecniche diverse di acquisizione 3D che sono trattate nella prima parte della tesi. La velocità di acquisizione e la precisione di tali strumenti vengono messi a confronto in una serie di prove.

Rispetto agli scanner a luce strutturata gli scanner laser hanno avuto per diverso tempo un potenziale vantaggio in termini di velocità in quanto era possibile ottenere con un unico movimento una lettura più veloce. Grazie però all'introduzione di una nuova serie di videocamere, un'elettronica rinnovata e a processori sempre più potenti la luce strutturata è in grado di offrire tempi di misura nell'ordine del secondo producendo nuvole di punti con oltre un milione di punti.

Gli scanner a luce strutturata diventano un ottimo strumento per acquisire dati digitalizzati in numerosi campi applicativi, in particolare nel campo dei dettagli in impiantistica.

Prima di procedere all'acquisizione e modellizzazione di componenti impiantistiche costituite da tubazioni idrauliche ed elettriche, sono stati effettuati alcuni test su varie tipologie di oggetti in ambienti interni: un elemento architettonico, un tavolo, un mobile racchiuso da ante a vetro e metalliche, un tubo porta-progetti come prove iniziali. Queste prove iniziali, oltre che per prendere dimestichezza con gli strumenti, sono state eseguite per valutare l'influenza delle proprietà degli oggetti e delle condizioni ambientali sulla qualità del modello ottenuto.

Il lavoro è proseguito scansionando e modellizzando tubazioni di varie dimensioni presenti nel corridoio al primo piano ed al piano interrato del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente ,del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI).

Lo scopo dei rilievi di tali elementi di impianti consiste nell'ottenere in modo indiretto informazioni geometriche attinenti alla forma e alle dimensioni delle tubazioni utilizzando determinati e specifici algoritmi scritti in diversi linguaggi di programmazione e software applicativi del settore. I risultati elaborati derivano da prove effettuate nel laboratorio di Fotogrammetria, Geomatica e GIS e fotogrammetria del Politecnico di Torino mediante lo scanner FARO Focus CAM2s 120 a postazione fissa e lo scanner Mantis Vision F6 smart.

Infine si mostreranno i risultati ottenuti, in particolare gli scarti conseguiti considerando:

- tipo di software utilizzato
- modalità di acquisizione con lo strumento a luce strutturata
- tipologia e caratteristiche degli oggetti rilevati
- condizioni ambientali del rilievo

La prima parte della tesi è composta da tre capitoli:

Il capitolo 1 tratta lo stato dell'arte per la modellizzazione e l'utilità del modello "as built".

Il capitolo 2 tratta delle metodologie e delle tecniche per rilievo 3D in relazione alla strumentazione impiegata.

Il capitolo 3 tratta gli strumenti utilizzati nelle prove e le relative caratteristiche e prestazioni.

Nella seconda parte della tesi:

Il capitolo 4 tratta le metodologie e le procedure utilizzate nelle prove eseguite in laboratorio relative alle acquisizioni con gli strumenti a disposizione e conseguenti valutazioni. Ogni prova è organizzata in un sottocapitolo.

Il capitolo 5 tratta l'elaborazione e l'analisi dei dati ottenuti nelle prove eseguite in laboratorio.

Le elaborazioni sono state fatte con software dedicati che verranno descritti nel primo paragrafo.

Seguono infine le conclusioni, la bibliografia completa di sitografia e gli allegati.



# Capitolo 1

## Importanza del modello “*as built*” in ingegneria

### 1.1 – Premessa

In questo capitolo si tratta sinteticamente dell’evoluzione della modellizzazione in campo ingegneristico. Viene introdotta la metodologia BIM ed il modello “as built” in relazione ai progressi della strumentazione per i rilievi del costruito negli ultimi anni. Il termine “as built”, significa “come costruito” e appartiene al gergo dell’ingegneria impiantistica (energetica, chimica, navale, ecc.) e civile.

Le tecnologie sempre più avanzate per rappresentare la realtà delle costruzioni portano a modelli sempre più completi che possono essere utilizzati per approfondire ogni aspetto del ciclo di vita degli edifici e degli impianti relativi.

Lo sviluppo della modellazione, grazie a software che utilizzano l’intelligenza artificiale per il 3D, ha consentito la realizzazione di database degli impianti, collegato al Modello 3D, permettendo di tenere aggiornati tutti i documenti in maniera integrata, efficiente ed economica.

Si tratterà inoltre dell’aspetto normativo al fine di collocare correttamente il modello “as built” all’interno della metodologia BIM.

### 1.2 - Modellizzazione

La rappresentazione della realtà mediante modelli ha subito una evoluzione esponenziale negli ultimi 20-30 anni dovuta soprattutto ai progressi degli strumenti a disposizione e alle potenzialità di calcolo degli strumenti informatici. Attualmente in campo ingegneristico i modelli maggiormente utilizzati al fine di analizzare o progettare sistemi reali sono i modelli matematici risolti mediante algoritmi e programmi con successiva creazione di rappresentazioni grafiche virtuali. In particolare in campo edilizio ed ingegneristico gradualmente i modelli 2D e 3D stanno per essere abbandonati a favore della progettazione 3D con metodologia BIM (Building Information Model/Modeling/Management). In realtà l’acronimo BIM si riferisce ad una triplice interpretazione che si è evoluta nel tempo: il Modello, inteso come tridimensionali 3D del costruito, la Modellazione, cioè i processi e le tecnologie utilizzate per la creazione del modello, il Management, visto come la gestione ed il controllo dell’intero processo. Attualmente gli impianti tecnologici (per esempio impianti idraulici ed elettrici) costituiscono parte importante delle costruzioni per il numero consistente e la complessità delle reti impiantistiche. Il vantaggio della metodologia BIM per gli impianti consiste nella possibilità di avere una visione d’insieme dell’intero sistema costituito dall’edificio e dagli stessi impianti creando un database a disposizione di tutti i progettisti e le altre figure coinvolte. Questo tipo di approccio è detto openBIM: infatti lo scambio di informazioni può avvenire grazie ai formati di dati digitali aperti sotto forma di file con formato IFC (Industry Foundation Classes) che possono permettere la collaborazione tra tutte le discipline specialistiche. Oltre che caricare diversi modelli di diverse discipline, i file IFC

vengono utilizzati anche per importare i dati da un'applicazione a un'altra. Oggetti BIM provvisti di geometria e dati possono essere esportati e quindi importati in un'altra applicazione per continuare la progettazione o l'analisi.

Il modello “as built” , argomento di questa tesi, con la classificazione riportata in tabella 1.3.1, costituisce il livello di dettaglio con LOD=500 in cui si rispecchia fedelmente la realtà, ed è una rappresentazione verificata in cantiere in termini di dimensioni, forma, posizione, quantità e orientamento; sono, inoltre, integrate tutte le informazioni di esecuzione e di eventuali varianti effettuate. Nel campo dell'impiantistica esistono gli applicativi MEP BIM (Autocad MEP, Revit MEP, Graphisoft MEP per Archicad) che utilizzano gli oggetti MEP (Mechanical, Electrical and Plumbing) che consentono di creare e modificare reti impiantistiche MEP 3D (condutture, tubazioni e cablaggi ecc.). Inoltre con il formato IFC possono condividere i file in formati OpenBim IFC.

E' opportuno evidenziare inoltre che il BIM diventerà gradualmente obbligatorio negli appalti in funzione dell'importanza economica in seguito ad un decreto ministeriale.

### **1.3 -Vantaggi del modello As Built**

Nella definizione originale prima della preponderante diffusione degli strumenti informatici con il termine “as built” si intendevano i disegni cartacei che descrivevano l'opera come è stata effettivamente costruita, a seguito di modifiche progettuali in corso d'opera o di difformità fra progetto e realizzazione. La necessità di modificare il progetto esecutivo con uno costruttivo (che può anche ricalcare completamente l'esecutivo) deriva tipicamente da esigenze di cantiere, nel corso del quale il progetto esecutivo elaborato dal progettista può risultare inattuabile o eccessivamente oneroso o potrebbe determinare ritardi di realizzazione. I disegni “as built”, quindi, sono i disegni finali che andranno a costituire l'archivio del progetto e che dovranno essere consegnati al cliente o al servizio manutenzione e gestione degli impianti per la corretta attuazione degli interventi di manutenzione o di emergenza.

I vantaggi di realizzare un modello “as built” sono la facilità e l'efficienza della gestione operativa e della manutenzione di tutti i componenti per tutto il ciclo di vita. Infatti, solitamente, intervengono variazioni durante l'esecuzione dei lavori per fattori non previsti nel modello progettuale. Per far fronte a questi problemi è necessario elaborare un rilievo dettagliato degli impianti, dopo il completamento, che porta alla realizzazione del modello “as built”.

L'evoluzione del modello “as built” ha seguito l'introduzione e lo sviluppo degli strumenti informatici: nel BIM il rilievo del costruito riporta quanto effettivamente è stato costruito ottenendo non solo un modello 3D aggiornato ma un modello completo ed organizzato in modo da comprendere tutte le informazioni consistenti in un ambiente digitale di raccolta organizzata e di condivisione di dati

relativi a quanto effettivamente realizzato. Fondamentale è stata la realizzazione di nuove modalità di effettuare rilievi sul costruito con strumentazione e software attualmente dotati di caratteristiche tali da costruire modelli virtuali sempre più dettagliati di quello che è stato costruito in cantiere.

La normativa del BIM identifica una scala di dettaglio relativa ad un progetto e a tutte le successive fasi. La norma italiana, trattando la definizione e la suddivisione del processo delle costruzioni nei vari stadi partendo dal progetto fino alla dismissione dell'edificio, è stata pubblicata nel gennaio 2017 -norma UNI 11337: "Edilizia e opere di ingegneria civile – Criteri di codificazione di opere e prodotti da costruzione, attività e risorse – Identificazione, descrizione e interoperabilità". Viene trattato nella norma il termine LOD (Level of Detail) che descrive il livello di dettaglio e di informazioni che sono contenute all'interno del modello. La normativa italiana permette di scegliere una scala LOD tra le esistenti purché sia definita in modo chiaro per tutti i soggetti interessati. Un esempio può essere tratto dalla seguente tabella dell'American Institute of Architects (AIA):

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
				
Modello contenente i requisiti di prestazione e le specifiche del sito. Modello concettuale di massa utile allo studio di tutto l'edificio inclusi area di base e volume, orientamento, stima costi iniziale. Progetto preliminare.	Modello contenente i sistemi generalizzati con quantità, dimensioni, forme, posizione ed orientamento approssimati. Progetto definitivo.	Modello di produzione o pre-costruzione, e per gli "intenti progettuali". Modello accurato e coordinato, utile per una stima più accurata dei costi. Progetto Esecutivo.	Modello accurato con i requisiti di costruzione e gli elementi costruttivi specifici.	Modello "as built" dell'edificio che mostra il progetto così come è stato realizzato.

**Fig. 1.3.1** - livelli LOD pubblicata dall'AIA

Il termine "as built" si riferisce al LOD 500: e' il livello più dettagliato per un modello BIM, denominato anche modello "as built" e rappresenta l'opera così come è stata realizzata in corso d'opera.

## Capitolo 2

### Metodologie e tecniche di rilevamento 3D

#### 2.1 - Classificazione

Si descrive l'acquisizione dei modelli 3D classificando le metodologie e le tecniche attualmente utilizzate. La trattazione è limitata alle tecniche impiegate in ingegneria, architettura e impiantistica.

I modelli 3D consistono in metodi di rappresentazione matematici relativi ad oggetti di forma tridimensionale. Il risultato consiste nel disporre di insiemi di dati digitali strutturati che rappresentano le proprietà geometriche dell'oggetto scansionato e che possono essere ulteriormente elaborati da algoritmi e programmi. Tali dati consistono in insiemi di punti che compongono un dato collettivo denominato nuvola di punti correlati, in alcuni casi, a immagini fotografiche.

Una volta ottenuto il modello 3D è possibile ricavare le dimensioni dell'oggetto in esame, come ad esempio altezza, larghezza, volume. Ogni tecnica di acquisizione presenta vantaggi e svantaggi per cui non esiste una tecnica con prestazioni superiori ad un'altra in assoluto, ma la scelta dipende dalle applicazioni cui è destinata. E' possibile classificare le procedure di acquisizione 3D in funzione delle metodologie e delle tecniche utilizzate per rilevare le caratteristiche geometriche e colorimetriche degli oggetti.

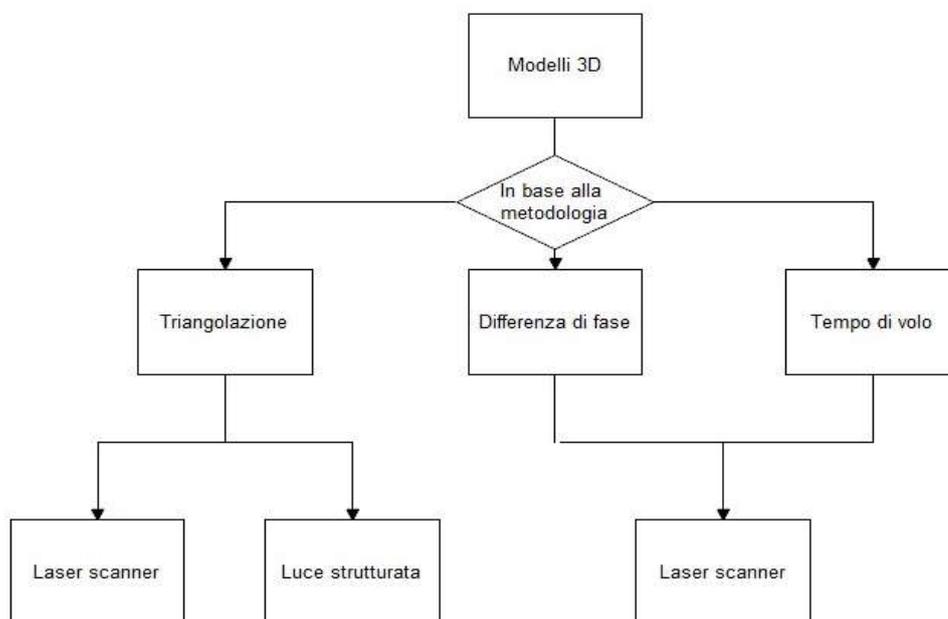
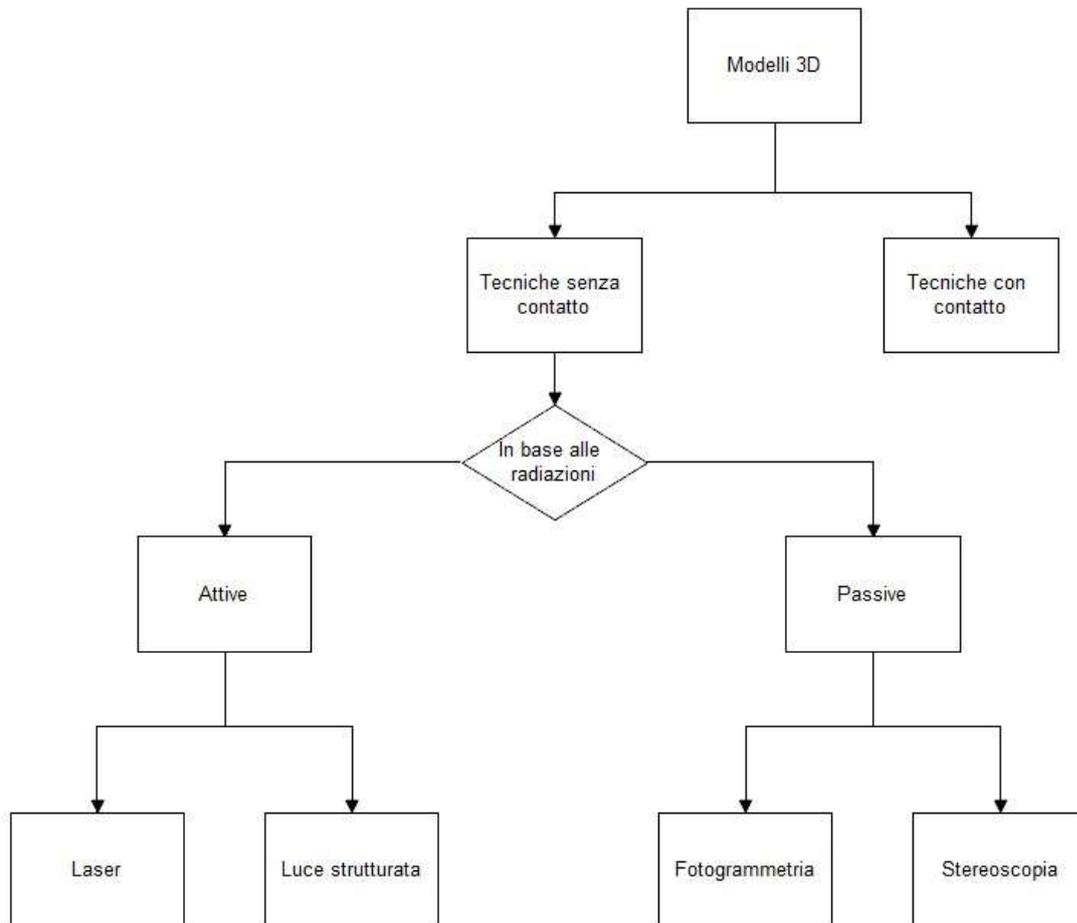


Fig. 2.1.1 - Classificazione delle metodologie per la creazione di modelli 3D

Una prima suddivisione è la seguente:

- Tecniche con contatto tra oggetto e sensori: CMM (Coordinate Measurement Machine).
- Tecniche senza contatto, divisibili in due sottocategorie: attive e passive.



**Fig. 2.1.2** - Classificazione delle tecniche per la creazione o visualizzazione di modelli 3D  
tralasciando ultrasuoni, raggi X e frequenze RADAR

Le tecniche con contatto si basano sull'impiego di strumenti che eseguono la scansione delle forme per contatto dei sensori con l'oggetto stesso da rilevare.

Le tecniche senza contatto passive utilizzano le radiazioni già presenti nell'ambiente, in particolare la luce naturale. Esempi di tale tecnica sono:

- Stereoscopia, che consiste nello stesso principio utilizzato dalla visione binoculare: l'oggetto viene osservato da due punti diversi e le immagini presentano delle differenze dalle quali è possibile ricavare la terza dimensione e la distanza dell'oggetto. Questa tecnica consente solo la visualizzazione del modello.

- Fotogrammetria, che utilizza riprese da diversi punti ottenendo fotogrammi dai quali è possibile ricostruire la forma dell'oggetto in base alle sue dimensioni. Tale tecnica è utilizzata principalmente in topografia ,architettura e cartografia. Le apparecchiature ottiche analogiche attualmente sono state sostituite dalle macchine fotografiche digitali con le quali si ottengono nuvole di punti che possono poi essere elaborate per ottenere i modelli 3D.

Le tecniche senza contatto attive utilizzano invece le radiazioni emesse dagli strumenti che, in funzione dei diversi casi, possono essere a frequenze ottiche oppure a frequenze appartenenti ad altre bande. Le informazioni sull' oggetto vengono ricavate dalle onde riflesse che colpiscono uno o più sensori dello strumento. Tralasciando ultrasuoni, raggi X e le frequenze dei RADAR, le radiazioni e gli strumenti che considero in questa tesi sono:

- Strumenti che impiegano la luce strutturata e la triangolazione.
- Strumenti che impiegano radiazioni laser: sono classificabili in funzione del metodo per calcolare le distanze: a tempo di volo, mediante la triangolazione oppure a differenza di fase.

Nei paragrafi che seguono si trattano le metodologie utilizzate nel 3D dai laser scanner e dagli strumenti a luce strutturata.

## **2.2 - Breve descrizione delle metodologie**

Vengono descritte le metodologie che vengono utilizzate dalle diverse tecniche di rilievo 3D:

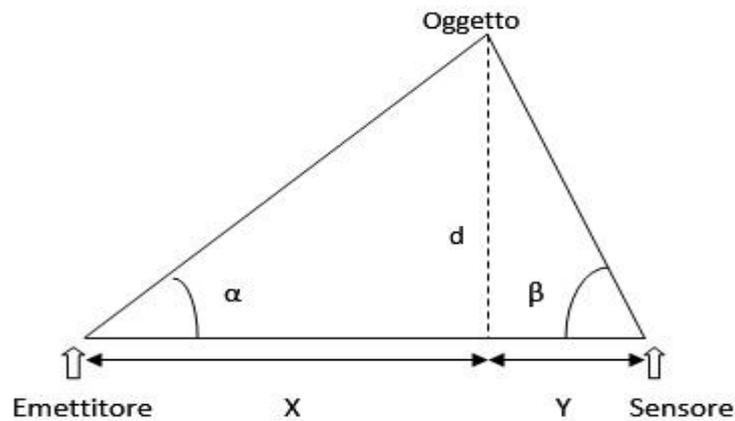
- Triangolazione
- Differenza di fase
- Tempo di volo (TOF)

### **2.2.1 - Triangolazione**

La triangolazione è un metodo che permette il calcolo delle distanze sfruttando le proprietà geometriche dei triangoli. Il termine triangolazione deriva dalla posizione di un emettitore, di un oggetto da analizzare e di un ricevitore, i quali formano appunto un triangolo. Emettitore e ricevitore sono separati da una distanza nota a priori (base line), sulla quale si basa il principio della triangolazione

In generale la tipica configurazione che sfrutta la triangolazione è riportata in fig. 2.2.1.1 e prevede un emettitore utilizzato per proiettare una radiazione sull'oggetto da analizzare ed un sensore che riceve la radiazione riflessa.

Principio della triangolazione:



**Fig. 2.2.1.1** - Triangolazione: calcolo della distanza  $d$  ( $d$  perpendicolare a  $L$ =base)

$$d = y \cdot \tan\beta \quad (1)$$

$$d = x \cdot \tan\alpha \quad (2)$$

$$L = x + y \quad (3)$$

$$d = y \cdot \tan\beta = x \cdot \tan\alpha \quad (4)$$

$$d = \frac{L \cdot \tan\alpha \cdot \tan\beta}{\tan\alpha + \tan\beta} \quad (5)$$

Nel caso della tecnica a luce laser utilizzata insieme alla metodologia della triangolazione, si hanno i seguenti vantaggi:

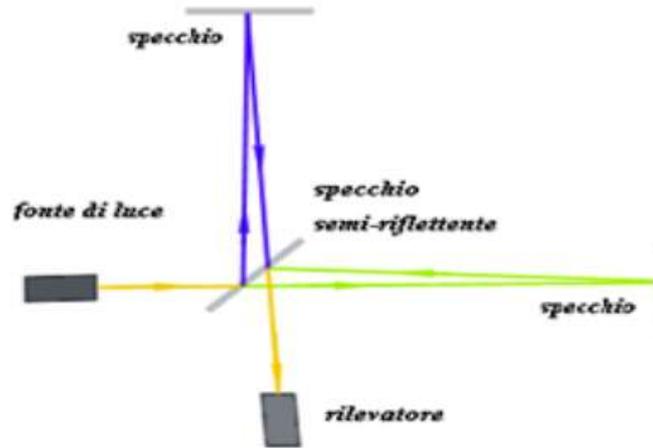
- Alta precisione (di ordine sub-millimetrico per i laser scanner triangolatori e scanner a luce strutturata)
- Possibilità di misurare quasi tutti i tipi di materiale
- Indipendenza dalla luce ambientale

Gli svantaggi sono i seguenti:

- distanza tra oggetto e sensore limitata
- dipendenza delle prestazioni dal tipo di materiale illuminato. Le riflessioni speculari di oggetti metallici, per esempio, possono creare un disturbo e degradare le prestazioni del sistema.;
- Il sistema deve prevedere la movimentazione dell'oggetto o della componente laser con un incremento dei costi nella realizzazione meccanica.

### 2.2.2 - Differenza di fase

Tale metodo utilizza la misura della differenza di fase tra l'onda emessa e l'onda ricevuta dallo strumento. Il principio di funzionamento si basa sull'interferometria, un metodo ormai consolidato per misurare le distanze con la massima accuratezza.



**Fig. 2.2.2.1** - Schema di principio dell'interferometro: percorso dei raggi all'interno dell'interferometro (in blu e verde i due raggi con diversi percorsi)

Nell'interferometria illustrata in fig. (2.2.2.1) l'unica onda emessa viene divisa in due onde con percorsi diversi per la presenza degli specchi riflettori e quindi si ricombina in unica onda che colpisce il rivelatore.

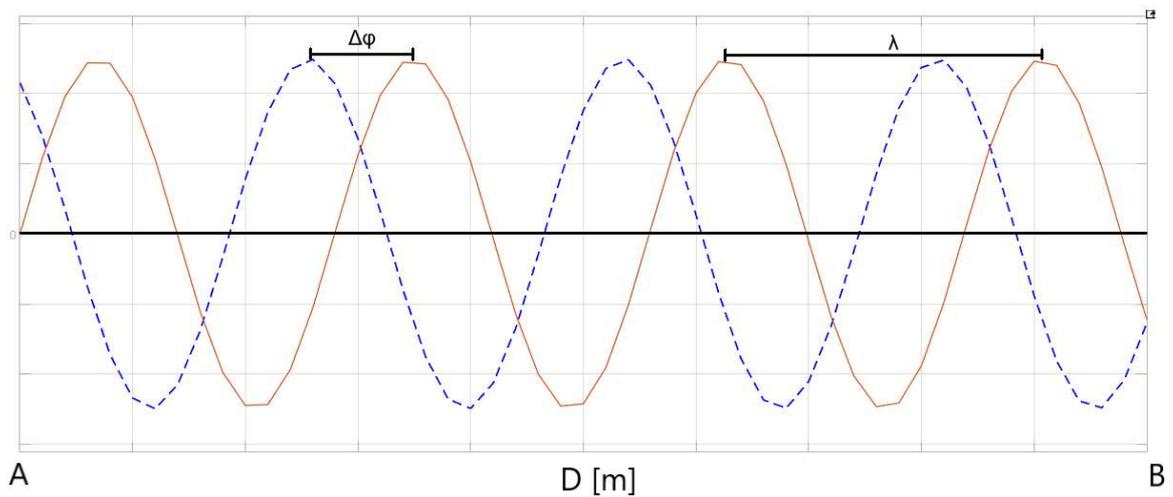
Il procedimento per il calcolo della distanza si basa sulla misura della differenza di fase tra l'onda elettromagnetica trasmessa e l'onda ricevuta. Si supponga che in A il trasmettitore invii all'oggetto B un'onda sinusoidale con lunghezza  $\lambda$  nota, velocità di propagazione  $v$  e intensità  $I$ :

$$\lambda = v \cdot t \text{ [m]} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \text{ [rad/s]} \quad (7)$$

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (8)$$

dove  $\omega$  è la pulsazione,  $T$  il periodo e  $\varphi_0$  la fase iniziale (in fig. 2.4.2  $\varphi_0 = 0$ )



**Fig. 2.2.2.2** - Misura della distanza  $D$  con metodo a differenza di fase (in rosso segnale trasmesso; blu tratteggiato: segnale ricevuto riflesso).

Sull'estremo B si ottiene che il segnale riflesso e rientrante in A riproduce i valori di quello emesso con un ritardo pari a

$$\Delta t = \frac{2 \cdot D}{v} \quad [s] \quad (9)$$

dove  $D$  è la distanza di propagazione del segnale stesso. Si avrà pertanto per il segnale rientrante:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot (t - \Delta t) + \varphi_0) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \Delta\varphi + \varphi_0) \quad (10)$$

$$\Delta\varphi = \omega \cdot \Delta t \quad [\text{rad}] \quad (11)$$

Avendo indicato con  $\Delta\varphi$  lo sfasamento, costante per una data distanza, tra il segnale emesso e quello ricevuto in A in uno stesso istante:

$$\Delta\varphi = \omega \cdot \Delta t = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \frac{2 \cdot D}{v} \quad (12)$$

da cui si ottiene

$$D = \frac{\Delta\varphi}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad [m] \quad (13)$$

Elenchiamo brevemente i vantaggi e gli svantaggi di questa metodologia.

Tra i vantaggi consideriamo:

- La lunghezza d'onda determina la risoluzione: con lunghezze d'onda micrometriche (frequenze dell'ordine dei MHz) si possono raggiungere valori prossime a 10 nm (misurazione di componenti meccanici in campo industriale).
- Campo di misura molto esteso: da zero fino a qualche km di distanza.
- Strumenti disponibili in commercio ad un prezzo elevato ma non proibitivo.

Tra gli svantaggi invece si considerano:

- Gli strumenti si comportano bene nel vuoto e nell'aria mentre in altri mezzi ci possono essere alterazioni di scala o perturbazioni locali dovute per esempio a disuniformità nel materiale che influisce sulle onde elettromagnetiche.
- La misura di fase in generale avviene in maniera non lineare; di conseguenza l'errore periodico è di pochi nanometri (nel campo del laser scanner e delle stazioni totali non interessa).
- Stima dell'ambiguità di fase (numero di cicli della forma d'onda compresi tra trasmettitore e ricevitore)
- Nel caso di bersaglio mobile (in campo meccanico) la velocità dello stesso deve essere limitata (max 4 m/s).

### **2.2.3 - Tempo di volo**

Il principio consiste nel misurare il tempo che un impulso impiega per viaggiare da un emettitore ad un oggetto e ritornare ad un sensore di rilevamento; conseguentemente viene misurato il tempo che il segnale impiega a percorrere la distanza tra il sensore e l'oggetto(target). Tali impulsi vengono poi convertiti in segnali elettrici e quindi elaborati per individuare la differenza temporale fra luce emessa e quella riflessa. Tipicamente il sensore è ottico nella banda dell'infrarosso 700÷1000 nm e a luce laser. Alcuni recenti dispositivi integrati in un unico sensore combinano un emettitore IR, un sensore di distanza e un sensore di luce ambientale.

Nota la velocità della radiazione emessa (velocità della luce  $c = 299,792,458$  m/s), mediante l'informazione del tempo è possibile determinare il percorso dell'impulso del laser, che è pari al doppio

della distanza dell'oggetto dal sensore. Questo tempo è denominato RTT (acronimo di Round Trip Time).

Siano:

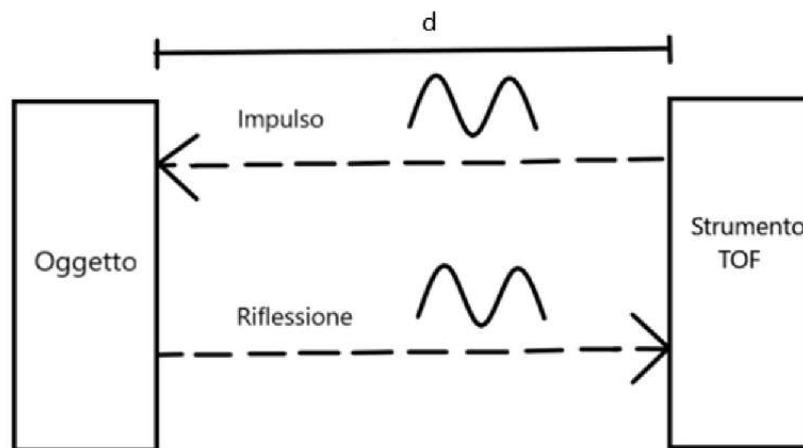
$$v = c = 299.792.458 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (14)$$

t = il tempo misurato dal sensore

d = il valore della distanza ricavata da:

$$t = \frac{2d}{v} \text{ [s]} \quad (15)$$

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \text{ [m]} \quad (16)$$



**Fig. 2.2.3.1** - Schema di principio del tempo di volo: percorso del segnale tra trasmettitore e ricevitore

Il metodo a tempo di volo è impiegato in due strumenti di rilievo 3D

- laser scanner TOF
- telecamere TOF

In ambito ingegneristico ed architettonico i laser scanner a tempo di volo permettono di coprire elevate distanze, anche dell'ordine di chilometri. Sono quindi indicati per la misurazione di grandi strutture, come ad esempio edifici o siti archeologici. A distanze dell'ordine del chilometro hanno precisioni circa 1 cm.

Le telecamere a tempo di volo, impiegate in ambito industriale, misurano distanze dell'ordine di qualche metro con precisioni di circa 1mm.

I vantaggi di questa tecnologia sono i seguenti:

- Maggiori distanze raggiunte con tecnologia a costo minore
- I sensori a tempo di volo sono compatti e in generale non richiedono particolari operazioni di installazione in ambito meccanico e industriale.
- Fornisce la distanza dei punti in modo diretto al contrario della triangolazione e della fotogrammetria che utilizzano particolari algoritmi
- Effettua misurazioni riprendendo tutta la scena in tempo reale grazie al microprocessore interno ad alcuni strumenti, per cui non è necessario avere un computer prestante.
- E' una tecnologia che funziona bene anche in presenza di cambi di luce al contrario della macchine stereografiche e fotogrammetriche.
- Nonostante il sensore sia di tipo ottico, l'elevata sensibilità del core TOF, permette di misurare anche superfici trasparenti e/o riflettenti. Infatti vengono correttamente rilevati materiali traslucidi e lastre di vetro (il range operativo dipende dal livello di trasparenza dell'oggetto).

Gli svantaggi di questa tecnologia sono:

- La tecnologia TOF utilizza in generale basse risoluzioni nelle fotocamere che permettono di ottenere un'informazione limitata relativamente alla geometria e alla superficie dell'oggetto.
- Non funziona molto bene su superfici poco riflettenti o di colore scuro a causa del debole segnale di ritorno.
- Sorgenti esterne come la luce naturale possono interferire con il segnale creando degli errori in fase di ricezione
- Difficoltà a ricostruire i bordi delle superfici in quanto il segnale viene riflesso in più direzioni e il ricevitore assorbe solo una parte del segnale riflesso. Per questo motivo il TOF genera un valore di profondità unico per più particolari di immagini.
- La presenza di un orologio al quarzo non permette di scandire il tempo velocemente
- Minore precisione rispetto alla differenza di fase

## 2.2.4 - Confronto Metodologie

In fig. 2.2.4.1 è riportato un confronto tra le precisioni dei metodi per la misura delle distanze: la triangolazione e il metodo a differenza di fase hanno una precisione maggiore a distanze meno elevate; a distanze maggiori la triangolazione presenta bassa precisione, gli strumenti a differenza di fase presentano maggiore precisione fino alle distanze che possono rilevare (circa 150 m.). L'ordine grandezza della precisione in termini di distanza varia da qualche millimetro a 25/30 metri.

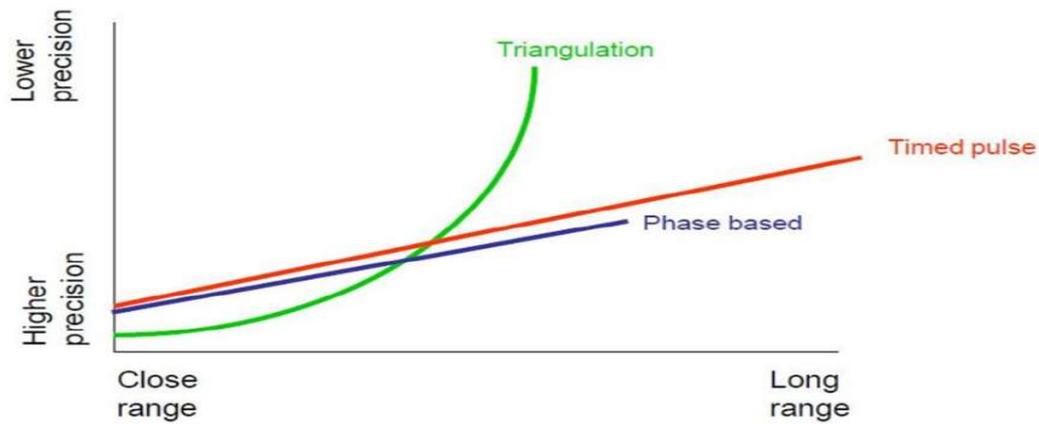


Fig. 2.2.4.1 - Accuratezza delle metodologie principali utilizzate in base alla distanza

## 2.3 - Tecniche senza contatto passive

Le tecniche passive utilizzano la luce presente nell'ambiente che colpisce gli oggetti da rilevare: gli strumenti impiegati attualmente sono dotati di sensoristica che permette di digitalizzare le immagini.

I metodi passivi sono economici perché nella maggior parte dei casi non necessitano di hardware specializzato, ma solamente di fotocamere digitali e di software di elaborazione delle immagini che sono reperibili con facilità.

### 2.3.1 - Stereoscopia e fotogrammetria

La stereoscopia è storicamente la prima tecnica, nata nella prima metà dell'ottocento, che ha permesso di percepire la profondità e la terza dimensione mediante l'invenzione di appositi strumenti.

La visione monoculare non è sufficiente a far apprezzare la profondità e la terza dimensione. La visione binoculare avviene invece quando il campo visivo di un occhio si sovrappone al campo visivo dell'altro occhio. Il cervello riceve una doppia immagine di ogni oggetto, una da ogni occhio: le due immagini presentano uno spostamento laterale causa la diversa posizione dei due occhi che distano 6-7 cm. Il cervello ha la capacità di fonderle ed unirle in un'unica immagine. Sulla base del funzionamento della visione umana, per poter creare un'immagine stereoscopica è necessario quindi acquisire due immagini di una scena da due punti diversi, ad es. con una macchina fotografica con due obiettivi.

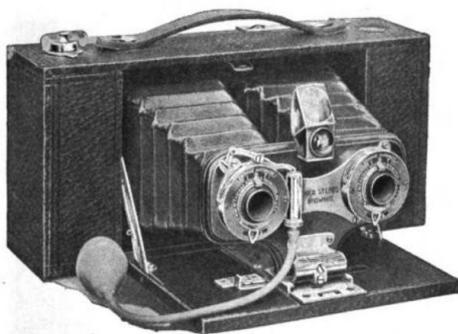


Fig. 2.3.1.1 - Fotocamera binoculare

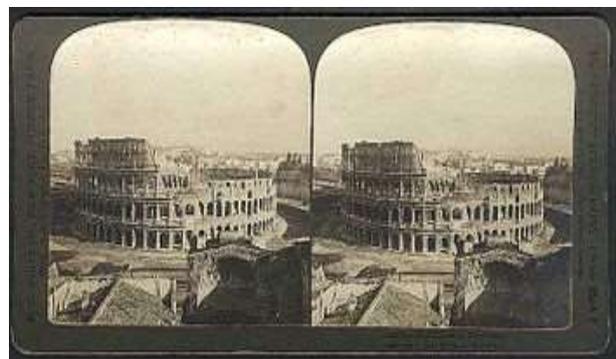


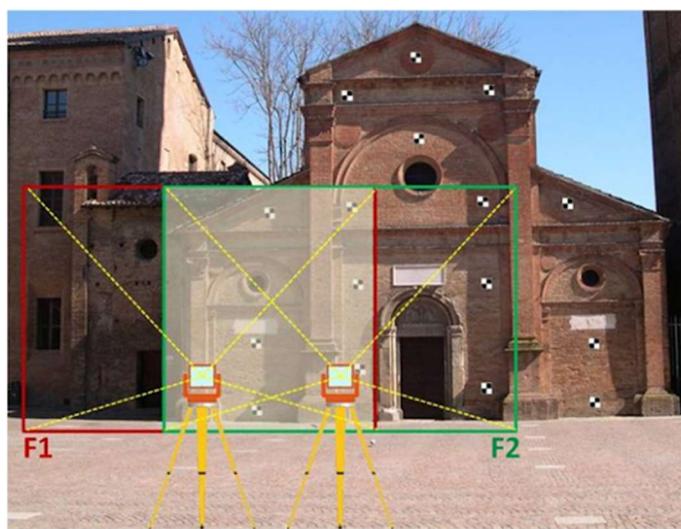
Fig. 2.3.1.2 - Immagine stereoscopica o stereogramma

La fotogrammetria è nata dalla stereoscopia e a differenza di quest'ultima che permette solo la visualizzazione dell'effetto tridimensionale, consente anche la ricostruzione di modelli 3D.

La fotogrammetria consente di determinare le caratteristiche geometriche e dimensionali di un oggetto partendo da due o più prese fotografiche da punti distinti nello spazio. In funzione della distanza e del campo di visione, questa tecnica può essere impiegata in molti ambiti: dalla microfotogrammetria utilizzata in laboratorio servendosi di stereomicroscopi, ad applicazioni e rilievi in architettura, cartografia, topografia, geologia, ed archeologia. Si distinguono due tipologie di applicazione in campo fotogrammetrico:

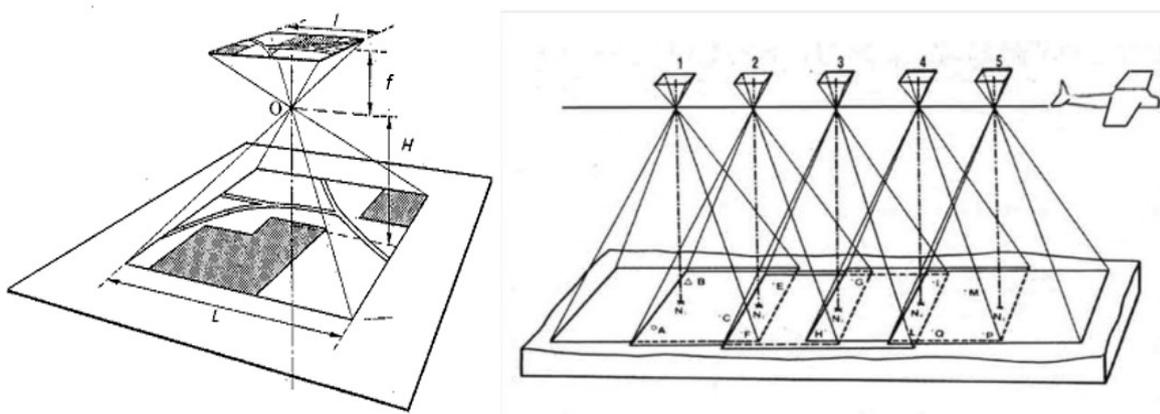
- Fotogrammetria terrestre
- Fotogrammetria aerea

La fotogrammetria terrestre viene identificata come fotogrammetria dei vicini o close range photogrammetry, quando gli oggetti interessati risultano situati ad una distanza inferiore ai 300 metri circa dalla camera di presa fotogrammetrica. Trova applicazioni oltre che per rilievi architettonici anche nella descrizione di smottamento del terreno, di frane o, a livello industriale, nello studio delle deformazioni di provini sottoposti a sollecitazioni indotte a titolo sperimentale. Per l'acquisizione delle immagini dell'oggetto da documentare, si impiega generalmente una coppia di fotocamere.



**Fig. 2.3.1.3** - Coppia di foto con ricoprimento nella fotogrammetria terrestre

La fotogrammetria aerea serve per produrre cartografie di qualsiasi tipo, da quelle generali a piccola scala, alle carte tecniche a grande scala.



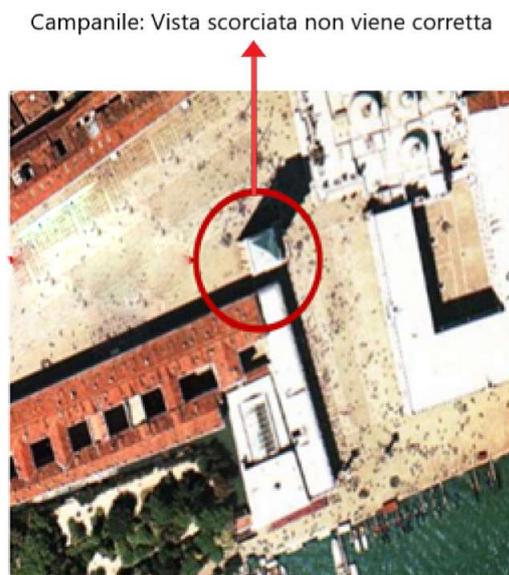
**Fig. 2.3.1.4** - Presa su piano orizzontale con fotogrammetria aerea

Il tipo di prodotto realizzabile dipende da molteplici fattori, tra cui la quota di volo ed il tipo di camera utilizzata. La scala di un fotogramma è data dal rapporto  $l/L$  fra la dimensione di un elemento

lineare sul fotogramma ( $l$ ) e la corrispondente dimensione dell'elemento sul terreno ( $L$ ). Considerando il terreno e il fotogramma dei piani orizzontali e paralleli tra loro, il fascio dei raggi ottici che convergono nell'obiettivo dà luogo alla relazione di similitudine tra triangoli dalla quale si desume la scala  $1/n$  del fotogramma.

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{L} = \frac{1}{\frac{H}{f}} \quad (17)$$

Esiste un unico caso in cui con un solo fotogramma si riesce ad ottenere un oggetto fotometrico. Questo è il caso di un oggetto piano o, nel caso si conoscano le quote, di un modello digitale del terreno (DTM). Le tecniche che possono utilizzare un solo fotogramma per acquisire l'immagine sono le ortofoto e i fotopiani. I fotopiani consentono di estrarre le coordinate bidimensionali di punti dalle immagini dove non interessa l'informazione della terza coordinata, mentre le ortofoto consentono l'estrazione di coordinate tridimensionali dalle immagini. Entrambe le tecniche consentono la misurazione delle distanze direttamente sulle immagini grazie a una correzione detta raddrizzamento.



**Fig. 2.3.1.5** - Estratto fotopiano di Venezia

**Fig. 2.3.1.6** - Estratto ortofoto di Mantova

La fotogrammetria tradizionale si è evoluta grazie alla trasformazione delle macchine fotografiche da analogiche a digitali. Le immagini digitalizzate costituiscono la base per l'elaborazione con software dedicati. La grande diffusione che si è avuta negli ultimi anni è dovuta al basso costo della strumentazione da utilizzare ed alla disponibilità di software specifici a basso costo e semplici da usare. Le macchine fotografiche digitali hanno infatti un costo nettamente inferiore ai laser scanner o agli strumenti a luce strutturata. Il modello 3D virtuale digitalizzato risultato del rilievo fotogrammetrico è una nuvola di punti che può essere integrata con altre nuvole 3D generate da diverse tecnologie di rilievo,

come ad esempio il laser scanner e georeferenziata con stazione totale oppure GPS e quindi confluire in un unico progetto.

Descriviamo i vantaggi e gli svantaggi di questa tecnica.

### **Svantaggi:**

- Procedura di orientamento piuttosto complessa per estrarre informazioni tridimensionali da una coppia di immagini
- Per creare il modello 3D dell'oggetto, bisogna prima fare una fase di image matching unendo i fotogrammi tra di loro.
- Necessita di determinate condizioni di luce per poter rilevare gli spigoli e i contorni di un oggetto

### **Vantaggi:**

- Tecnica molto flessibile data la portabilità delle camere.
- Basso costo a parità di prestazioni rispetto a scanner 3D laser (rapporto costo 10/1).
- Le immagini fotogrammetriche consentono di creare un database con elevata qualità visiva, molto adatto per rivestire un modello 3D.

La precisione con cui si ricavano le distanze dipende dal rapporto tra la distanza della camera dall'oggetto al quadrato e la distanza tra le camere detta base di presa  $b$ . Per aumentare la precisione occorre avvicinarsi all'oggetto o aumentare la base di presa  $b$ . In generale il rapporto base-distanza vale:

- $\frac{B}{d} = \frac{1}{2}$  per la fotogrammetria aerea
- $\frac{B}{d} = \frac{1}{3}$  per la fotogrammetria terrestre.

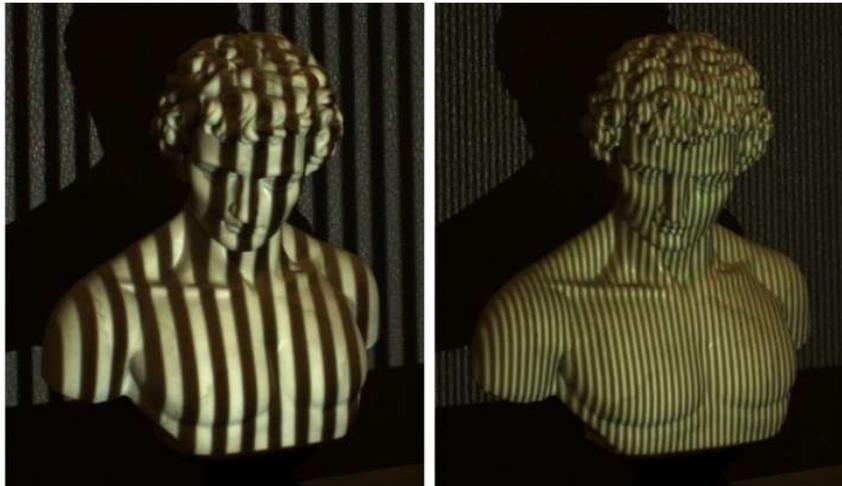
## 2.4 – Tecniche attive senza contatto

Nelle tecniche attive senza contatto vengono descritte le due principali tecniche utilizzate in campo civile e topografico:

- Luce strutturata
- Laser

### 2.4.1 - Luce strutturata

La tecnica della luce strutturata è stata sviluppata in risposta alle crescenti esigenze del mercato per strumenti professionali dedicati a misurazioni precise. La tecnica della luce strutturata proietta righe orizzontali e verticali di radiazioni note sull'oggetto (infrarossi o luce bianca) e ne determina la profondità e la superficie in base alla deformazione della griglia proiettata denominata pattern (fig 2.4.1.1).



**Fig. 2.4.1.1** - Pattern di luce sull'oggetto per rilevarne la deformazione

Proiettando una stretta banda di luce nel campo dell'infrarosso o della luce bianca o blu su un oggetto tridimensionale si produce una linea di illuminazione che appare distorta da punti di osservazione diversi dal proiettore e può essere usata per una ricostruzione geometrica esatta della forma della superficie illuminata mediante le sezioni luminose rilevate. Dalla misurazione dello scostamento tra le linee visualizzate sull'oggetto ed il pattern iniziale e conoscendo la geometria del sistema di acquisizione dello strumento utilizzato è possibile determinare le coordinate tridimensionali xyz dei punti della superficie dell'oggetto. La larghezza delle strisce utilizzate determina la precisione con cui si effettua l'acquisizione dei dettagli. Spesso si possono usare diversi tipi di pattern codificati al fine di evitare incertezze sulle misure effettuate.

I vantaggi della tecnica a luce strutturata sono:

- l'elevata velocità: si possono infatti acquisire contemporaneamente centinaia di migliaia di punti, se non l'intero campo di vista (gli strumenti sono anche detti scanner a "campo intero"). Possono elaborare fino a 15-30 scansioni complete, c.a. 2.000.000 di pixel al secondo. La durata di una scansione è di qualche minuto (4/5 min).
- elevata precisione dovuta alla sovrabbondanza di informazioni acquisite che permettono una ricostruzione più fedele dell'oggetto ripreso -accuratezza fino a 0,1%.
- non sono necessari target nella post-elaborazione
- Portabilità dello strumento.

Gli svantaggi della tecnica a luce strutturata sono:

- apprendere l'uso corretto dello scanner e saper valutare la qualità della scansione ottenuta nel dettaglio sul momento non è semplice ed immediato.
- la tecnologia a luce strutturata percepisce la distorsione del fascio luminoso e conseguentemente tutti gli oggetti con alta riflettività non vengono correttamente acquisiti.
- mancanza di capacità di memoria ed elaborazione adeguate all'interno dello strumento che richiedono collegamento ad un computer in contemporanea alla scansione.

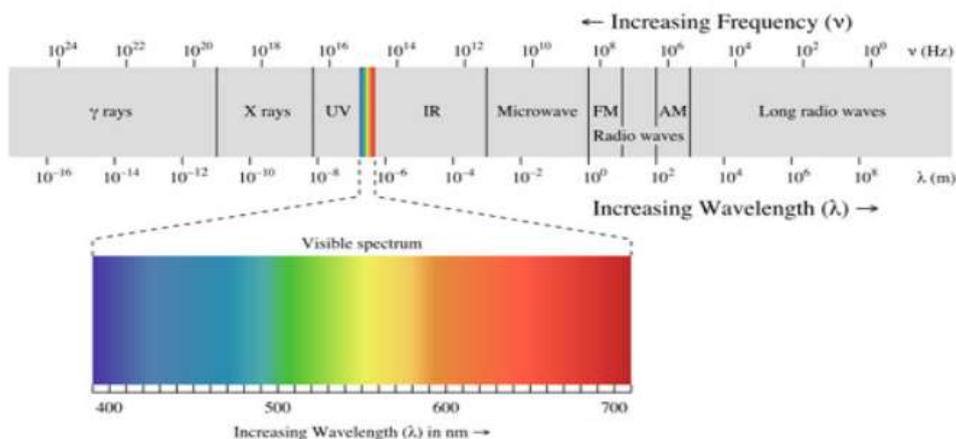
## **2.4.2 - Laser**

Laser è l'acronimo in inglese di Light Amplification by the simulated emission of radiation ovvero amplificazione di luce tramite emissione stimolata di radiazioni.

Il laser presenta delle particolari caratteristiche. Di seguito si citano quelle più importanti:

- **Unidirezionalità:** la luce laser si propaga in una direzione ben definita a differenza di una normale lampadina ad incandescenza che emette luce in tutte le direzioni; un fascio laser a grande distanza diverge in maniera minima;
- **Monocromaticità:** la radiazione laser presenta sempre una stessa frequenza mentre una lampadina ad incandescenza emette radiazione composta da più frequenze con energie differenti.
- **Coerenza:** il fascio di luce laser deve essere costituito da onde della stessa frequenza e della stessa fase che si sommano insieme producendo una grande intensità e potenza.

La lunghezza d'onda del laser può variare da 200 nm a 700 nm passando così dall'ultravioletto al visibile e all'infrarosso.

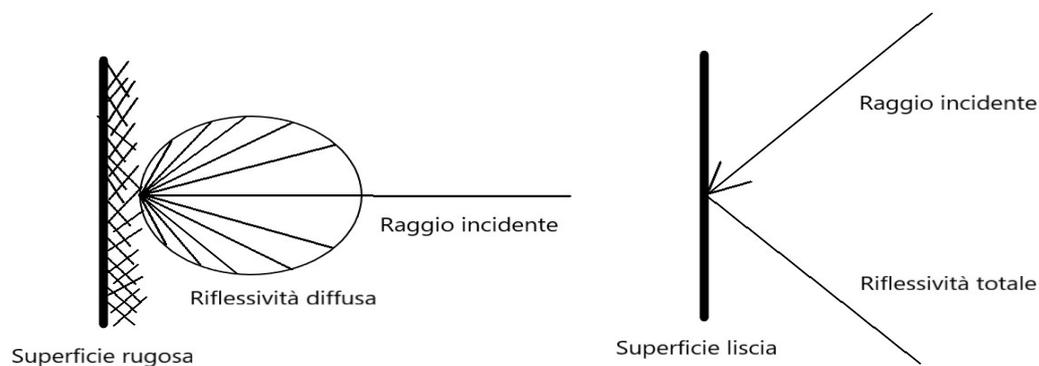


**Fig. 2.4.2.1 - Spettro elettromagnetico**

Un laser è costituito tipicamente da un cilindro allungato di materiale attivo, in grado di amplificare la radiazione che lo attraversa, inserito fra una coppia di specchi contrapposti, che rinviano continuamente la radiazione attraverso il materiale stesso. I tipi di laser si suddividono in base allo stato di aggregazione del materiale attivo. Si hanno così:

- Laser a stato solido, a cristalli e vetri o a semiconduttori
- Laser a liquidi
- Laser a gas

La proprietà fondamentale del raggio laser è la riflessione sui diversi materiali. Questa dipende dalla rugosità della superficie e dalla lunghezza d'onda del laser. Nel caso di superficie rugosa la riflessione segue il principio di Lambert quindi la direzione di riflessione è indipendente da quella del raggio incidente al contrario di una superficie perfettamente liscia dove la riflessione è speculare. In realtà è difficile trovare superfici perfettamente lisce o rugose. Il raggio laser quindi si comporta in maniera ibrida. Infine se il raggio incide una superficie retroriflettente come un prisma, questo viene respinto della stessa identica direzione del raggio incidente.



**Fig. 2.4.2.2 - Riflettività del laser su una superficie**

In campo topografico la luce laser viene utilizzata in alcuni strumenti :

- Stazione totale utilizzata per misurare angoli e distanze
- Distanziometro utilizzato per misurare distanze
- Laser scanner utilizzato per creare nuvole di punti di oggetti 3D

Nel capitolo successivo, si approfondiranno le tipologie di laser scanner presenti sul mercato, in quanto lo strumento sarà utilizzato anche nelle prove sperimentali.

## 2.5 - Tecniche a contatto

### 2.5.1 - CMM Scanner 3D a contatto

Questa tecnologia, pur non essendo inerente agli strumenti utilizzati in questa tesi, merita un cenno per la diversa modalità di acquisizione, a contatto con l'oggetto da rilevare. Gli scanner 3D a contatto, denominati CMM (Coordinate Measuring Machines), determinano forma e dimensioni dell'oggetto analizzato attraverso il contatto fisico di una sonda. Il movimento della sonda può avvenire tramite un carrello munito di un braccio rigido, un braccio articolato oppure una combinazione dei due. Dalla conoscenza della posizione del braccio mentre è a contatto con l'oggetto è possibile determinare le coordinate dei punti della superficie. Si può ottenere un'elevata precisione nella misurazione.



**Fig. 2.5.1.1** - Misurazione con sensore a contatto

Uno dei principali svantaggi però è proprio il contatto fisico con l'oggetto in esame necessario per effettuare la misurazione, il quale potrebbe venire modificato o danneggiato durante l'analisi, per esempio nel caso di materiali fragili o superfici cedevoli al contatto. Inoltre sono relativamente lenti, se paragonati ad altre tecniche di scanning 3D e molto costosi, in quanto necessitano di un elevato numero di sensori ad alta precisione per la determinazione della posizione del braccio durante la scansione.

## Capitolo 3

### Gli scanner 3D

#### 3.1 - Premessa

Nella prima parte vengono riportati i parametri caratteristici e le prestazioni degli scanner in generale. Nella seconda parte le specifiche con i parametri e le prestazioni degli strumenti utilizzati F6 e Faro.

#### 3.2 - Parametri caratteristici degli scanner

Nelle specifiche tecniche degli strumenti per le acquisizioni 3D a luce strutturata o laser sono riportate le grandezze caratteristiche che permettono di valutare le prestazioni e verificare se lo strumento è idoneo per il rilievo in esame. Le grandezze principali sono:

- **Accuratezza:** indica la proprietà fondamentale di ottenere misure corrispondenti al valore reale, evitando di trovare un punto dell'oggetto non corrispondente al vero. Caratteristica determinante nel caso ad esempio del rilievo del costruito e degli impianti, ove è necessario visualizzare particolari. L'accuratezza non dipende solo dallo strumento e dalla metodologia di scansione, ma anche dalle caratteristiche proprie dell'oggetto da rilevare e dalle condizioni ambientali. L'unità di misura è il metro con i suoi sottomultipli.
- **Risoluzione di scansione** (densità dei punti della nuvola): i punti della nuvola possiedono una dimensione e sono distanti uno dall'altro: entrambe queste grandezze determinano la capacità di misurare i dettagli geometrici dell'oggetto, quindi il minimo misurabile. Dalla risoluzione massima dipende la densità massima della nuvola di punti. Le specifiche tecniche degli strumenti riportano due differenti grandezze per fornire la risoluzione come valore angolare o come distanza lineare riferita ad una sfera concentrica allo strumento. Un ridotto passo angolare permette di contenere le distanze tra i punti della nuvola, quindi di avere un rilievo più particolareggiato. La risoluzione ottenibile è uno dei fattori principali che determinano la scelta di utilizzo di uno strumento piuttosto di un altro. E' necessario scegliere la risoluzione, che è possibile impostare mediante il software dello strumento, tenendo in considerazione anche la portata. Questo in quanto la scelta di risoluzione e portata necessarie dipendono dallo scopo del rilievo e va cercato il giusto compromesso tra le due grandezze. Si può avere la necessità di raggiungere elevate risoluzioni a brevi distanze come nel caso di impianti o particolari architettonici.
- **Velocità di acquisizione:** rappresenta il numero di punti al secondo che vengono rilevati. Si tratta di centinaia di migliaia di punti al secondo (rispettivamente 76.000 e 640.000 punti al

secondo per gli strumenti che ho utilizzato). Ogni singola scansione infatti può impiegare da alcuni secondi ad alcune decine di minuti. Tale grandezza è molto apprezzata in campo lavorativo perché permette di limitare il lavoro fuori sede. La durata della scansione dipende da numerosi fattori: dal campo visivo di acquisizione, dal principio di misura del range (tempo di volo, differenza di fase, triangolazione), dalla distanza dell'oggetto, dalla velocità dei sistemi ottici di puntamento.

- **Accuratezza nella riflettanza:** caratteristica rilevante nel risultato di una scansione è la proprietà di riflettere la luce da parte dell'oggetto detta riflettanza o riflettività. Il valore di riflettanza della superficie colpita dalla luce incidente viene rilevato durante la scansione e sarà tanto più alto quanto la superficie tenderà al colore bianco. Se la riflettività varia durante la scansione è possibile osservare errori nelle zone di transizione. L'assorbimento, da parte dei materiali, in alcune lunghezze d'onda, determina una difficile misurabilità.
- **Livello di rumore:** valore che rappresenta la quantità di elementi indesiderati e la loro collocazione all'interno della nuvola.
- **Campo di misura o profondità di campo:** rappresenta la minima e massima distanza alla quale si possono effettuare i rilievi ed è generalmente espressa in metri. La portata massima dipende dal tipo di segnale emesso, dalla direzione con cui la radiazione colpisce la superficie dell'oggetto, ma soprattutto, come già evidenziato, dalle caratteristiche di riflettività della superficie. Materiali che assorbono le radiazioni in quantità notevoli riducono l'intensità del segnale di ritorno allo strumento. Il segnale di ritorno indebolito dall'elevato assorbimento del materiale determina una riduzione della portata di misura. Le portate vanno attualmente da alcune decine di centimetri ad alcune centinaia di metri. In tutti i casi, come intuibile, all'aumentare della portata corrisponde una diminuzione della risoluzione d'acquisizione, quindi per scansioni ad elevate distanze, cioè qualche centinaio di metri, la risoluzione è di qualche centimetro o anche di qualche decimetro. Con gli strumenti che si basano sul principio della triangolazione le distanze misurabili non sono elevate come negli strumenti a tempo di volo: d'altra parte l'accuratezza degli strumenti che utilizzano la triangolazione è nettamente superiore alla prestazione, in termini di accuratezza, degli strumenti a tempo di volo. Con la triangolazione è possibile arrivare ad accuratezze dell'ordine di 10 micron.
- **Campo di scansione:** Il campo di scansione è una grandezza espressa in valori angolari che definiscono l'ampiezza dello spazio in orizzontale ed in verticale che lo strumento è in grado di acquisire in una scansione. L'intero campo è rappresentabile da una sfera concentrica con il sensore di rilevamento: esistono strumenti con possibilità di acquisizione di nuvole con valori angolari prossimi a 360°.
- **Sicurezza per la vista:** la sicurezza dei raggi emessi viene definita mediante una scala di classi che partendo dalla classe I (intrinsecamente sicuri) arriva alla classe 4: gli strumenti che ho utilizzato rientrano nelle prime due classi.

- **Registrazione del dato colorimetrico:** presenza di sensori in grado acquisire e correlare l'informazione del colore con il dato geometrico della nuvola di punti.
- **Impiego di fotocamere:** le fotocamere che completano i rilievi sono interne allo strumento, oppure possono essere utilizzate anche esternamente. Le fotocamere digitali interne usano i sensori CCD (Charge Coupled Devices, Dispositivi ad Accoppiamento di Carica) oppure altre tecnologie di sensoristica in grado di trasformare l'energia luminosa incidente in cariche elettriche e segnali digitali. L'acquisizione dell'immagine con la fotocamera avviene contemporaneamente alla scansione. Al fine di aumentare la qualità dell'immagine dovuta alle prestazioni della fotocamera in alcuni strumenti è previsto posizionare sullo strumento una fotocamera esterna. La gestione della fotocamera esterna avviene con il programma che gestisce lo stesso scanner ed in tal modo il fuoco, le grandezze di posizione e di mira della ripresa sono coordinate tra lo strumento e la stessa fotocamera.
- **Interfacce software:** Esistono numerosi applicativi per utilizzare gli strumenti e sono costituiti da programmi da installare su PC. Lo scopo è di elaborare e gestire i dati di scansione in modo efficiente, utilizzando procedure automatiche per il riconoscimento degli oggetti, provvedere all'elaborazione di nuvole di punti con operazioni di selezione, editing e segmentazione di nuvole di punti, eliminazione di punti doppi e filtraggio del rumore per utilizzarle al meglio in successive applicazioni. Alcuni eseguono anche la colorazione delle scansioni. L'elaborazione richiede PC con prestazioni e velocità notevoli in quanto i dati da trattare sono rilevanti: alcuni programmi prevedono una compressione, visualizzazione e iterazione di nuvole di punti al fine di ridurre fino al 20% il volume dei dati da trattare in modo da evitare PC potenti o con schede 3D dedicate.
- **Facilità d'uso e di trasporto**

### 3.3 - Strumenti a luce strutturata

Gli scanner a luce strutturata sono molto veloci nel processo di rilevamento della superficie, perché tutte le parti dell'oggetto colpite dal pattern di luce sono acquisite allo stesso momento. Centinaia di migliaia di punti vengono digitalizzati contemporaneamente. Una o più videocamere vengono utilizzate per catturare l'immagine della deformazione del pattern. Dall'elaborazione delle immagini ottenute con algoritmi molto complessi eseguiti dal calcolatore si può ottenere la nuvola di punti dell'oggetto. La videocamera permette di completare le informazioni relative alle coordinate spaziali con immagini di tessitura superficiale anche a colori.



Fig. 3.3.1 - Schema a blocchi di uno scanner a luce strutturata

E' necessario, per avere un'acquisizione dell'intera superficie dell'oggetto, effettuare scansioni da diverse angolazioni: questo in quanto spesso alcune porzioni dell'oggetto restano nascoste o in ombra. La scansione dell'intero campo visivo in una frazione di secondo riduce o elimina il problema della distorsione durante lo spostamento dello strumento. Le varie acquisizioni devono essere allineate in modo da ottenere tutta la volumetria dell'oggetto. Al fine di avere questo risultato si effettua una rotazione dell'oggetto posizionandolo su un piano rotante (fig. 3.3.2) o con gli strumenti portatili si effettua una scansione muovendosi nello spazio intorno all'oggetto



**Fig. 3.3.2** – Esempi di dispositivi che sfruttano la luce strutturata

Il metodo proiettivo sfrutta mezzi che generano luce non coerente, ovvero dei proiettori. In questo caso la precisione dello strumento è fondamentale: se da un lato sono presenti piccole discontinuità dovute ai bordi dei pixels stessi che compongono l'immagine, dall'altro queste possono essere attenuate dalla messa a fuoco dell'obiettivo.

La qualità dei risultati dipende però fortemente dal livello di precisione con cui è possibile rilevare la deformazione del pattern proiettato sull'oggetto nell'immagine acquisita. È quindi necessario effettuare un'accurata calibrazione dello scanner prima di procedere all'acquisizione. Il metodo con cui si ricostruisce la geometria dell'oggetto colpito dalla luce strutturata è la triangolazione. Il "trucco" è l'uso della parallasse stereoscopica per ottenere le informazioni sulla terza dimensione. La parallasse è il fenomeno per cui un oggetto sembra spostarsi rispetto allo sfondo se si cambia il punto di osservazione e quantitativamente si indica con il valore dell'angolo di spostamento. Calibrando il sistema, un algoritmo di triangolazione è in grado di ricostruire il modello 3D dell'oggetto triangolando la sorgente di luce, la telecamera e il punto della superficie dell'oggetto colpito dal pattern di luce.

La tecnica descritta è stata utilizzata nello strumento che ho impiegato per le prove e lo studio dei rilievi descritti nei capitoli successivi. Si tratta dello strumento modello F6 smart della casa costruttrice Mantis Vision, in dotazione al laboratorio del DIATI (Dipartimento Ingegneria Ambiente Territorio Infrastrutture) del Politecnico di Torino.

### **3.4 - Laser scanner**

I Laser scanner sono strumenti capaci di catturare ad alta velocità la realtà circostante sotto forma di punti tridimensionali nello spazio. Tali punti compongono un dato denominato nuvola di punti, composto da migliaia o milioni di singoli punti discontinui tra loro ed organizzati in righe e colonne così che ad ogni punto sia possibile associare un intorno di punti regionalmente vicini. Questa organizzazione rende la nuvola di punti una nuvola strutturata. Durante l'operazione di scansione, lo strumento salva i dati i angolari, la distanza e la riflettanza che sarà tanto più alta quanto la superficie tende al bianco. La riflettanza indica la proporzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere. Ha quindi un significato fisico ben preciso ed il suo valore è legato alle caratteristiche del materiale di cui è costituita la superficie scansionata. Il laser viene impiegato per sondare l'oggetto punto per punto: per mezzo di un sensore si cattura la posizione del punto del laser proiettato sulla superficie e si ricava la

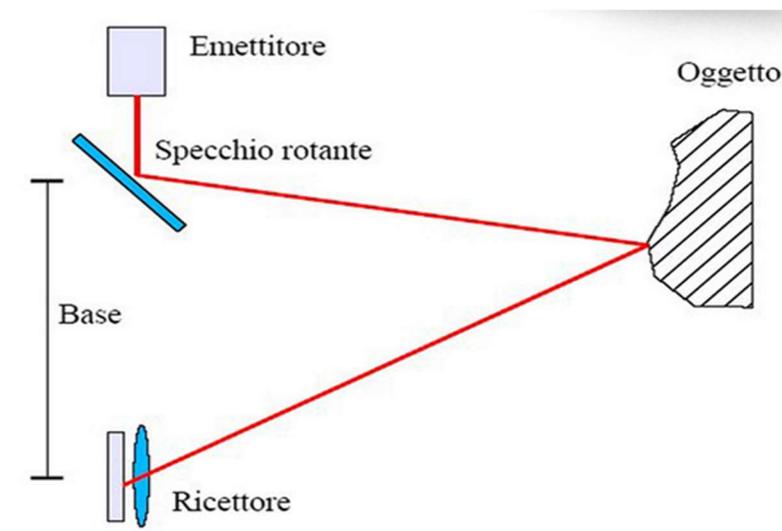
distanza dell'oggetto. Mediante più acquisizioni nelle quali viene variata la posizione del punto proiettato, causa il movimento dello specchio rotante, è possibile determinare la geometria completa dell'oggetto in esame. Lo specchio viene fatto ruotare per mezzo di un motore in modo da evidenziarne le diverse zone.

Sostanzialmente ci sono tre tipologie di laser scanner utilizzati in campo topografico in base alla metodologia utilizzata:

- Triangolazione
- Differenza di fase
- TOF (tempo di volo)

Nella fig. 3.4.1 viene rappresentato lo schema della triangolazione all'interno di un laser scanner.

L'emettitore e il sensore che inviano e ricevono il raggio riflesso dall'oggetto sono posti alla distanza corrispondente alla base line. La proiezione del raggio nei vari punti può venire variata mediante uno specchio rotante. Per gli scanner a triangolazione la base-line diminuisce con il quadrato della distanza scanner- oggetto.



**Fig. 3.4.1** - Configurazione tipica di un sistema di triangolazione per lo scanning 3D

In base al principio della triangolazione sono noti anche i laser a lama di luce: una sottile lama di luce viene proiettata sul target, che ne modifica la forma in base all'andamento della propria superficie. Il profilo dell'oggetto viene elaborato da appositi algoritmi che associano delle coordinate metriche ad ogni punto. Mediante diverse scansioni si ottengono più profili e quindi l'immagine 3D.

I laser a differenza di fase calcolano la distanza attraverso algoritmi specifici che rilevano la misura tramite differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta. Questi laser scanner sono particolarmente veloci ed hanno una griglia di punti molto densa. La loro possibilità di sfasamento però limita la gittata massima ad alcune centinaia di metri. Una velocità tipica di questi scanner si attesta intorno ai 500.000 punti al secondo. Per il principio di funzionamento e i relativi vantaggi si rimanda la lettura al paragrafo 2.2.2.

I laser scanner a tempo di volo si basano sul tempo che l'onda impiega tra l'istante in cui viene emessa e quello in cui viene ricevuta. La velocità tipica di questi scanner dipende dalla gittata massima: possiamo indicare 200.000 punti al secondo per una distanza di 6 km. Questi scanner supportano il rilevamento a distanza molto alte, però questo porta a velocità delle operazioni di scansione molto ridotte. Per esempio, se il laser punta nel vuoto ed è configurato per rilevare fino a 6 km, questo significa attendere che la luce percorra 6 km di andata e 6 km di ritorno. Nonostante si tratti di 0,00004 sec per singolo punto, la reiterazione di questo intervallo per alcuni milioni di punti può portare ad attese di minuti e frazione di ore. Infatti, nel caso di 50 milioni di punti rilevati, in totale si avrebbero 600.000.000 km di distanza percorsi dal raggio laser che comporterebbero più di 30 minuti di attesa. Per il principio di funzionamento e i relativi vantaggi si rimanda la lettura al paragrafo 2.2.3.

Viene riportata di seguito una tabella con alcuni modelli di laser scanner che si basano sul principio del tempo di volo e della differenza di fase.

<i>Modello</i>	<i>Principio di misura *</i>	<i>Max FOV</i>	Campo inquadrato	<i>Min/max range[m]</i>	<i>Precisione angolare</i>	<i>Precisione nella distanza</i>	<i>Camera</i>
<b>Leica Scanstation2</b>	TOF	18.5 kg	270 × 360	0.3–300	0.003°	4 mm @ 50 m	integrated, 1 Megapx
<b>Leica C10</b>	TOF	13 kg	270 × 360	0.3–300	0.006°	4 mm @ 50 m	integrated, 4 Megapx
<b>Leica HDS6200</b>	PS	14 kg	310 × 360	0.4–79	0.007°	3mm @ 50 m	add-on optional
<b>Riegl VZ-1000</b>	TOF	9.8 kg	100 × 360	2.5–1,350	0.0005°	8 mm @ 100 m	add-on optional
<b>Riegl VZ-400</b>	TOF	9.8 kg	100 × 360	1.5–350/600	0.0005°	5 mm @ 100 m	add-on optional
<b>Optech ILRIS HD-ER</b>	TOF	14 kg	40 × 40 (360 × 360)	3–2,000	0.003°	7 mm @ 100 m	integrated, 3.1 Mpx
<b>Optech ILRIS</b>	TOF	14 kg	40 × 40 (360 × 360)	3–3,000	0.004°	7 mm @ 100 m	integrated, 3.1 Mpx

**Tab. 3.4.1** - Tabella dati tecnici laser scanner a differenza di fase (PS) e a tempo di volo (TOF)

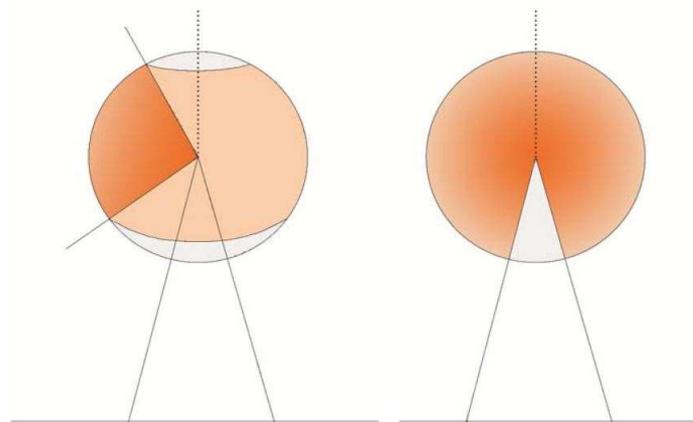
Negli scanner che misurano il T.O.F. oppure utilizzano il metodo delle differenze di fase, l'accuratezza varia in modo lineare rispetto alla distanza e con valori che dipendono dal tipo di strumento. L'accuratezza è indicata generalmente nelle specifiche tecniche dei costruttori in base al

range di acquisizione. Gli scanner 3D laser, rispetto agli scanner 3D a luce strutturata possiedono la capacità di acquisire le geometrie 3D con accuratezza e risoluzione migliori a maggiori distanze dall'oggetto scansionato e per questo vengono maggiormente impiegati in applicazioni metrologiche. Ad esempio negli strumenti dove è presente la rotazione degli specchi l'accuratezza dipende dall'errore angolare sia verticale che orizzontale e varia da strumento a strumento determinando un errore di posizionamento corrispondente.

Un'ulteriore suddivisione può essere fatta in base al campo visivo, parametro già descritto nel sottocapitolo precedente:

- Panorama Scanner
- Camera Scanner
- Scanner ibridi

I panorama scanner hanno un campo visivo quasi sferico, limitato unicamente dalla base dello strumento. La quasi totale copertura del campo visivo fa sì che questo tipo di strumento si presti molto bene alla scansione di interni di edifici e gallerie. I camera scanner hanno un limitato campo visivo, paragonabile a quanto accade in una fotocamera, l'intervallo angolare di scansione è limitato sia sul piano orizzontale che verticale. Questo tipo di scanner è pratico per scansioni di superfici poste a lunga distanza dallo strumento. Gli scanner ibridi possono compiere rotazioni complete solamente attorno a uno degli assi. La rotazione attorno al secondo asse è limitata entro i  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$ .



**Fig. 3.4.2** - Campo visivo laser scanner

### 3.5 - Strumenti utilizzati nelle prove

In questo lavoro di tesi le prove sono state effettuate utilizzando due diversi strumenti per misure su oggetti ed impianti:

1) il modello F6-smart della Mantis Vision che utilizza la tecnica di generazione e ricezione di luce strutturata ed- il principio della triangolazione, già noto anche in topografia. Si tratta di uno strumento portatile che l'utente manovra spostandolo in continuazione riprendendo quindi l'oggetto da diverse angolazioni

2) Il secondo strumento utilizzato - Focus 3D CAM 120s prodotto dalla FARO - usa invece il principio della misura di differenza di fase tra le onde trasmesse e ricevute di un raggio laser emesso spazialmente in tutte le direzioni in tempi successivi coprendo di fatto tutto il campo visivo. Lo strumento viene posizionato in un punto fisso e l'oggetto viene scansionato grazie al movimento dello specchio rotante presente all'interno.

#### 3.5.1 - F6 smart Mantis Vision

Scanner con tecnologia a luce strutturata e triangolazione, di dimensioni ridotte e portatile, provvisto di una fotocamera in grado di acquisire video con una frequenza di default di 8 frame per secondo (FPS). Questa funzione consente di acquisire un modello a colori di tipo additivo (RGB). Oltre a questa, sono presenti due sensori ad infrarosso (IR) in grado rispettivamente di trasmettere e ricevere il segnale, dopo che il segnale è stato riflesso dall'oggetto in esame. E' idoneo per rilievi di ambienti interni adibiti a locali tecnici d'impianti. Vengono riportate di seguito le specifiche tecniche dello strumento come da manuale della casa costruttrice Mantis Vision:



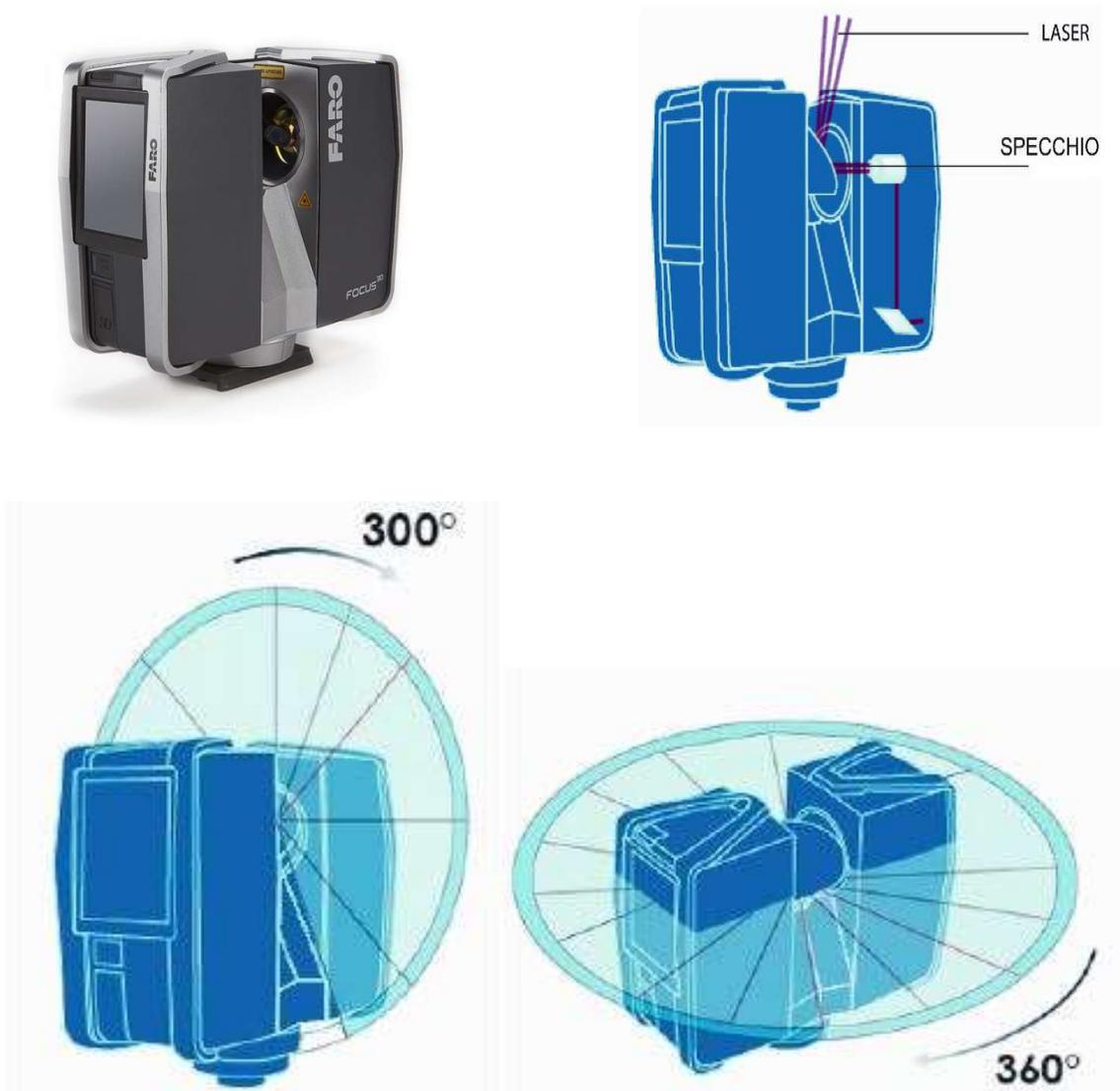
**Fig. 3.5.1.1a** - Scanner portatile F6 smart **Fig. 3.5.1.1b** - Scanner F6 su treppiede e fotocamera superiore

**Caratteristiche dello strumento:**

Accuratezza:	fino a 0,5 mm
Risoluzione:	fino a 1 mm
Livello di rumore:	meno di 0,5 mm
Sicurezza per la vista:	Class 1 (intrinsecamente sicuri)
Condizioni di luce:	dal buio totale alla luce diurna
Profondità di campo:	da 0,5 a 4,5 metri
Campo visivo a 0,5 metri	51 cm x 67 cm
Campo visivo a 4,5 metri	458 cm x 607 cm
Angolo di visuale:	54° x 68°
Risoluzione della fotocamera:	1,3 Mpix [Megapixel]
Velocità dei fotogrammi	8 FPS [fotogrammi al secondo]
Velocità di acquisizione:	640.000 [punti/secondo]
Dimensioni:	32 X 12 X 4,5 cm
Peso:	1 Kg
Temperatura di esercizio:	+ 5° C - +50° C
Software: ECHO fornito con lo strumento:	

### 3.5.2 - Laser scanner FARO FOCUS 3D CAM 2 s 120

Lo strumento impiegato nelle prove è un laser 3D tridimensionale ad alta velocità che si basa sul principio di misura a differenza di fase. Idoneo per tutte le attività di misurazione e documentazione per cui è necessario un elevato grado di dettaglio a distanze fino a 120 metri. La compattezza e la semplicità di utilizzo consentono di risparmiare il tempo di scansione ed elaborazione rispetto ai laser scanner tradizionali. Focus3D genera, con precisione millimetrica, una copia virtuale della realtà con velocità che può raggiungere i 976.000 punti di misurazione al secondo.



**Fig. 3.5.2.1** - Focus 3D S120: specchi rotanti e raggio laser emesso in verticale ed orizzontale

Focus3D S120 presenta le seguenti caratteristiche principali come ricavate dal manuale della casa costruttrice:

Caratteristiche	Valori	Note
Range distanze	0,6-120 m	
Velocità di misurazione massima	976000 pti/sec	
Errore del raggio	± 1mm	
Precisione angolare	0,019°	Per angoli verticali e orizzontali
Classe di sicurezza del laser	Classe 1	
Classe di protezione	IP 54	
Dimensioni	230x183x103 mm	
Peso	4,2 kg	

Le caratteristiche secondarie dello strumento sono le seguenti:

- Fotocamera a colori integrata: 165 milioni di pixel High Dynamic Range (HDR) 2x/3x/5x
- Fotografia
- Compensazione in loco
- Registrazione in loco (con CAM2 SCENE)
- Funzione Scan Group (riscansione di target distanti con una risoluzione più elevata)
- Funzione di crittografia digitale
- Multisensore: GPS, bussola, sensore di altezza e di livello, compensatore biassiale.
- Registrazione automatica.

## Capitolo 4 Prove eseguite: obiettivi e procedure applicate

In questa sezione sono riportate le procedure delle prove eseguite utilizzando lo scanner a luce strutturata F6; alcune (prove n.3 e n.6) sono state integrate con scansioni mediante il laser scanner FOCUS 3D 120s. Nel capitolo successivo vengono riportati le metodologie e i risultati delle elaborazioni con appositi software.

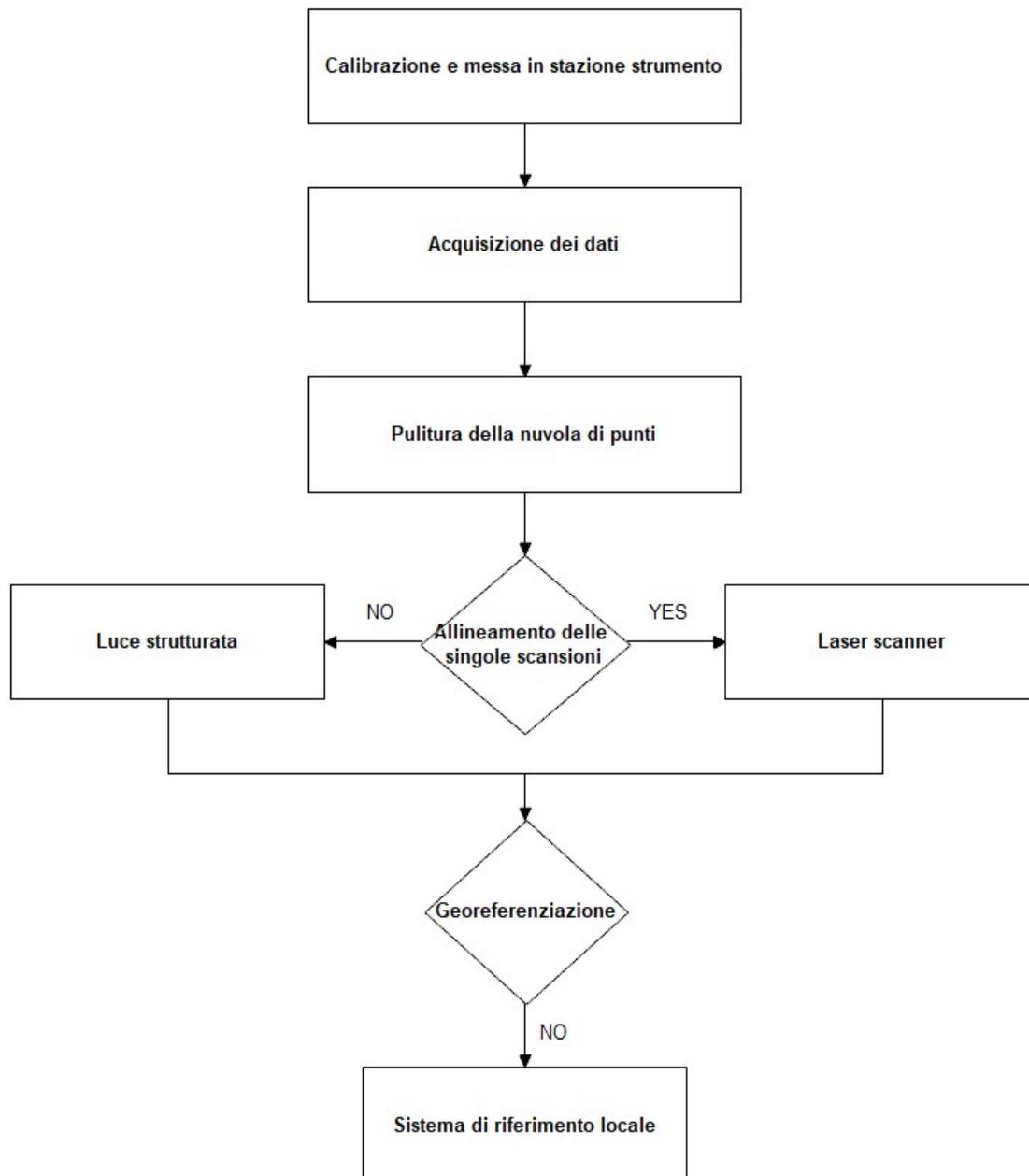
Le prove 1,2,3 sono relative ad oggetti a geometria nota e di dimensione finita con lo scopo di determinare il comportamento della strumentazione in diverse situazioni di oggetti indoor.

Le prove 4,5,6 sono relative ad una parte di impianto costituita da tubazioni idrauliche ed elettriche presenti nei sottoservizi del Politecnico di Torino.

- 1) La prima prova è stata caratterizzata dallo studio di un rilievo architettonico in differenti condizioni di luce. Lo scopo del test è valutare le funzionalità del software proprietario ECHO dello strumento F6 e la ricostruzione dei dettagli del rilievo da parte dello scanner F6.
- 2) La seconda prova è relativa al rilievo di un tavolo, sempre con lo strumento a luce strutturata, in cui si è voluto testare se lo strumento è in grado di rappresentare oggetti con una dimensione prevalente sulle altre (in questo caso la lunghezza del tavolo) e valutare la risposta ad una superficie riflettente.
- 3) La terza prova ha contemplato l'utilizzo sia della luce strutturata sia del laser scanner. L'oggetto rilevato è l'insieme di tre armadi di cui due metallici e uno con ante a vetro. In questo caso la prova è stata effettuata per valutare le differenze tra le acquisizioni di superfici metalliche, di superfici vetrate, e di oggetti collocati oltre i vetri.
- 4) La quarta prova è relativa al rilievo di una tubazione che si estende per l'intera altezza di una parete situata all'interno del corridoio al primo piano del DIATI del Politecnico di Torino. In questo caso si è voluto provare a ricostruire il modello matematico del cilindro suddividendolo in sezioni circolari per individuare in maniera automatica il raggio e il centro.
- 5) La quinta prova è relativa a un cilindro consistente in un tubo porta-progetti appoggiato su un piano in ambiente indoor. La forma e la posizione dell'oggetto permettono di effettuare una scansione a 360° e quindi di ottenere un modello 3D di una forma cilindrica ideale. Sono state fatte diverse elaborazioni di un'unica scansione per valutare quale minima porzione della nuvola è necessario considerare per ricavare un valore accettabile del raggio che non si differenzi eccessivamente dal valore ottenuto con la scansione a 360°.
- 6) La sesta prova è stata condotta in un corridoio presente al piano interrato all'interno del DIATI, per una lunghezza di circa 42 metri, per testare se lo strumento è in grado di ricostruire un modello piuttosto esteso senza errori di sovrapposizione, andando a confrontarlo con una scansione laser 3D. In seguito si è realizzato un modello matematico per le tubazioni presenti sul soffitto del corridoio.

Si sottolinea il fatto che le prime due prove hanno voluto essenzialmente testare le funzionalità dello strumento a luce strutturata, senza utilizzare particolari elaborazioni con software dedicati, e per questo motivo vengono interamente riportate in questo capitolo.

Le operazioni necessarie per le prove consistono in:



**Fig. 4.1** - Schema operazioni necessarie

**Calibrazione e messa in stazione degli strumenti.** Prima dell'inizio delle prove è necessario effettuare alcune operazioni iniziali:

- lo scanner a luce strutturata necessita di essere calibrato, utilizzando un file apposito fornito dalla casa madre; al fine di avere una buona resa cromatica è necessario effettuare il bilanciamento del bianco per avere una buona resa cromatica; impostare i parametri del software proprietario ECHO in base all'oggetto e all'ambiente in cui è collocato.
- Il laser a scansione terrestre deve essere collocato e fissato sopra un treppiede in modo tale che la base dello strumento risulti essere orizzontale. Non è necessario utilizzare il piombo laser per affinare il posizionamento dello strumento poiché non è stata fatta nessuna operazione di georeferenziazione. L'impostazione dei parametri prima di effettuare la scansione viene descritta nelle singole prove.

**Acquisizione dei dati.** Ogni scansione possiede un proprio sistema di riferimento che generalmente coincide con il centro dello strumento. Durante l'acquisizione viene generata una nuvola di punti per ogni scansione: la nuvola è limitata dalle dimensioni della finestra di scansione e dalle parti non visibili dell'oggetto. Nel caso in cui l'oggetto non sia stato acquisito completamente si rende necessario scegliere dei punti di riferimento che, per lo strumento a luce strutturata sono costituiti da punti facilmente riconoscibili (es. spigoli o discontinuità). Invece per il laser scanner è possibile utilizzare dei target artificiali posizionati in modo tale da essere acquisiti in due o più scansioni contigue.

**Pulitura della nuvola di punti.** Si attua un filtraggio del rumore presente nella nuvola di punti acquisita dovuto essenzialmente alla divergenza del fascio laser ed ai problemi di individuazione della direzione del fascio stesso. In tale fase si esegue anche l'eliminazione di dati spuri o legati a disturbo (oggetti non analizzati).

**Georeferenziazione.** Nelle prove non è stata eseguita in quanto non ci si è soffermati sulle problematiche relative al posizionamento del modello. Per questo motivo il sistema di riferimento utilizzato è stato quello locale generato dallo strumento.

**Allineamento delle singole scansioni** (o registrazione delle scansioni). È la procedura che consente di allineare ed unire le singole acquisizioni in una unica nuvola di punti secondo un determinato sistema di riferimento. Essa può essere eseguita mediante algoritmi di surface matching dove due scansioni adiacenti devono comprendere un numero minimo di punti in comune (generalmente si ricorre ad una sovrapposizione del 30%). In particolare l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point), allinea le parti comuni di scansioni adiacenti attraverso la minimizzazione della distanza tra esse. Va sottolineato che la precisione ottenibile mediante surface matching è generalmente migliore di quella ottenibile mediante

i soli punti di controllo; il secondo tipo di registrazione è quindi generalmente limitato a quei casi in cui non sia possibile disporre di una quantità sufficiente di punti in comune tra scansioni adiacenti.

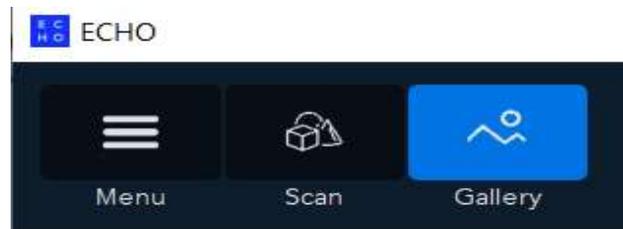
Si riportano in forma tabellare (tab. 4.1) le prove eseguite evidenziando gli oggetti scansionati, la strumentazione utilizzata, il numero delle scansioni effettuate per ogni prova e lo scopo della prova.

N.	OGGETTO	F6 smart	FOCUS 3D CAM 120s	N. scansioni	OBIETTIVO
1	Fregio architettonico	X		6	Testare lo strumento nella ricostruzione del modello 3D
2	Tavolo	X		2	Testare lo strumento nella ricostruzione di oggetti con una dimensione predominante sulle altre
3	Mobile a vetri e metallico	X	X	- 3 con CAM2 - 1 con F6	Differenza in termini di distanza e densità tra le nuvole ottenute con i due strumenti
4	Tubazioni impiantistica 1 piano	X		1	Valutazione parametri geometrici delle tubazioni e differenza rispetto a diametri reali misurati con calibro
5	Tubo portaprogetti di riferimento	X		1	Valutazione parametri geometrici del modello cilindrico variando numero di punti e forma della nuvola
6	Tubazioni impiantistica piano interrato	X	X	- n. 8 con CAM2 -n. 1 con F6	Valutazione comportamento su tubazioni di lunghezza oltre i 30 metri di lunghezza con cambi di direzione

**Tab. 4.1** - Sommario delle prove eseguite

## 4.1 - Software ECHO per F6

Il software di base utilizzato per l'analisi è ECHO, fornito dalla casa madre di produzione dell'F6. Il software presenta un'interfaccia di facile interpretazione, caratterizzata principalmente da tre finestre: menu, galleria e scansione.



**Fig. 4.1.1** - Finestre principali del software ECHO

In primo luogo è necessario effettuare la calibrazione dello strumento attraverso un file sempre fornito dalla casa madre dello scanner.

Le elaborazioni delle scansioni effettuate dal software ECHO possono essere eseguite in modo:

- Manuale.
- Automatico.

La registrazione manuale prevede la necessità di procedere traslando e ruotando le nuvole appartenenti a diversi gruppi in modo da allinearle visivamente (metodo poco preciso e poco raccomandato). In modalità automatica è il software stesso che nel processo di registrazione cerca di abbinare i dati degli insiemi dei frame e i dati delle nuvole dei punti acquisiti.

E' quindi consigliato il modo automatico, che prevede le seguenti modalità:

- registrazione HQ (Alta Risoluzione): è un processo generale di registrazione eseguito prima delle altre operazioni di elaborazione al fine di migliorare la qualità delle immagini.
- registrazione globale: la registrazione globale è un processo complementare che mira alla rettifica degli errori cumulativi che non possono essere individuati prima dell'acquisizione di tutti i frame e dei gruppi di nuvole.
- registrazione sequenziale: le singole nuvole di punti vengono acquisite una dopo l'altra ricercando i punti in comune al fine di ricostruire un unico risultato finale.

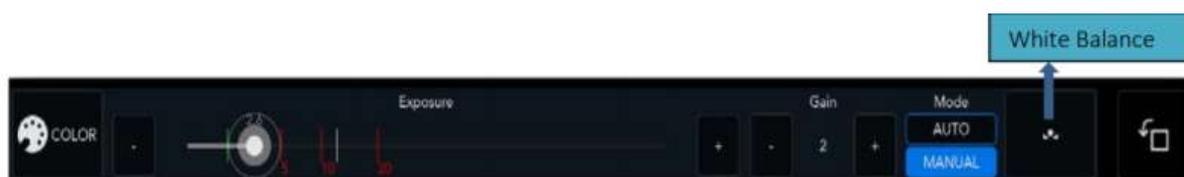


**Fig. 4.1.2** -Schermata per scelta della modalità di registrazione delle nuvole sul software ECHO

Prima della scansione si devono impostare alcuni parametri, in particolare:

- l'esposizione, cioè la quantità di luce che viene ricevuta dal sensore digitale della macchina.
- il guadagno che rappresenta il rapporto tra l'uscita del sensore in valori di corrente e tensione rispetto a quanta energia luminosa colpisce il sensore.

L'impostazione di questi parametri dipende dall'intensità della luce naturale e/o artificiale presente nell'ambiente del rilievo desiderati per ottenere una buona resa cromatica nella costruzione del modello finale.



**Fig. 4.1.3** - Barra per la taratura della luminosità della scansione

Altri parametri che potrebbero essere modificati per esigenze particolari sono:

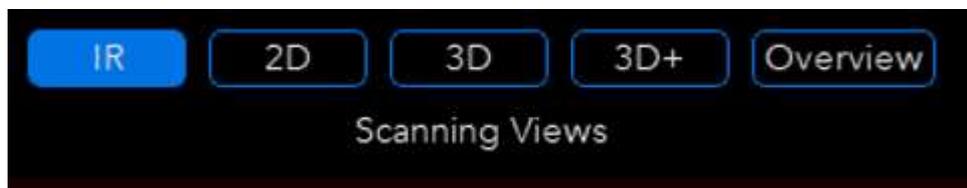
- la frequenza di acquisizione video espressa in frame/sec (8 frame/sec di default)
- la densità della nuvola di punti.
- l'intensità e la lunghezza d'onda del raggio infrarosso.

Nelle prove eseguite questi parametri sono stati lasciati ai valori di default.

Prima di iniziare la scansione, si può scegliere la modalità di visualizzazione della camera dello strumento:

- IR: Utilizzando la modalità IR si può visualizzare il pattern sull'oggetto, e nel caso di rilievi statici, dovrebbe coprire la maggior parte della superficie di un oggetto poiché il decodificatore F6 trasformerà solo le aree coperte dal pattern in nuvole di punti
- 2D: La modalità fotocamera 2D viene utilizzata per l'acquisizione video durante la scansione, fornendo una proiezione dell'immagine dell'oggetto che si sta digitalizzando.

- 3D: Nella modalità fotocamera 3D si può visualizzare la decodifica in tempo reale del singolo frame acquisito in nuvola di punti. Il singolo frame può contenere circa 70.000 punti con un campo visivo diagonale di 80 °.
- 3D+: La modalità fotocamera 3D + viene utilizzata per la registrazione online (usando punti in comune in tempo reale), mostrando il fotogramma corretto combinato con tutti gli altri fotogrammi decodificati durante la scansione.
- 3D Overview: La modalità Panoramica 3D offre una vista in tempo reale del modello in costruzione. Si può utilizzare questa modalità per verificare lo stato della scansione dell'oggetto e, nel caso si trovino dati mancanti, si può ripetere la scansione dell'area mancante tornando sull'oggetto con lo strumento.



**Fig. 4.1.4** - Modalità di visualizzazione della camera dello strumento

Nella parte destra dell'interfaccia principale sono riportati i gruppi che si generano alla fine di una scansione. Un gruppo conterrà segmenti (unione di frame) registrati uniti, che aiuteranno a modificare la nuvola di punti scansionata. Ogni gruppo ha diverse opzioni:

- È possibile nascondere / mostrare ciascun gruppo / segmento singolarmente premendo l'icona a forma di occhio (attiva / disattiva visibile) accanto al relativo gruppo.
- È possibile eliminare l'intero gruppo o eliminare ciascuno dei segmenti premendo sull'icona di eliminazione accanto ad esso. Questa azione eliminerà il gruppo / segmento in modo definitivo.
- Per visualizzare o modificare solo il gruppo selezionato, si utilizza l'icona della matita, che consente di manipolare i dati della nuvola di punti scelti nello spazio 3D.



**Fig. 4.1.5** – Esempio di gruppo di frame

## 4.2 - Prova n.1: rilievo elemento architettonico

Il primo oggetto rilevato è stato un bassorilievo architettonico (fig. 4.2.1) presente all'interno del laboratorio. Sono state effettuate n.6 scansioni al fine di familiarizzare con lo strumento a luce strutturata F6 Smart. Il rilievo è stato effettuato anche per verificarne le prestazioni, il corretto funzionamento e i risultati ottenibili per un oggetto indoor. Le scansioni sono state effettuate con varie condizioni di illuminazione.



Fig. 4.2.1 – Fotografia del rilievo architettonico

### 4.2.1 – Scansioni della parte anteriore del fregio

Considerato che solo la parte anteriore del bassorilievo si presenta con superfici in rilievo, mentre la parte posteriore è piana, si sono effettuate scansioni plurime privilegiando solo la parte anteriore nelle prime tre: in questo caso è possibile verificare come si presenta il rilievo di un oggetto con parti non raggiungibili dall'infrarosso dello strumento.

Prima della scansione si devono impostare alcuni parametri, in particolare:

- l'esposizione, cioè la quantità di luce che viene ricevuta dal sensore digitale della macchina.
- il guadagno che rappresenta il rapporto tra l'uscita del sensore in valori di corrente e tensione rispetto a quanta energia luminosa colpisce il sensore.

L'impostazione di questi parametri dipende dall'intensità della luce naturale e/o artificiale presente nell'ambiente del rilievo desiderati per ottenere una buona resa cromatica nella costruzione del modello finale.

- nella prima scansione l'esposizione è stata impostata pari a 5 su 10 ed il guadagno pari a 2 su 8
- nella seconda scansione l'esposizione è stata impostata pari a 5 su 10 ed il guadagno pari a 8 su 8

Il risultato della scansione n. 1 non è risultato soddisfacente, in quanto sono stati generati 3 gruppi (in questo caso ogni gruppo rappresenta una nuvola di punti riferita allo stesso oggetto che non è stata allineata con le altre); pur eliminando il gruppo con pochi frame (1 frame) non è stato possibile migliorare il risultato durante la registrazione automatica delle nuvole (fig. 4.2.1.1).



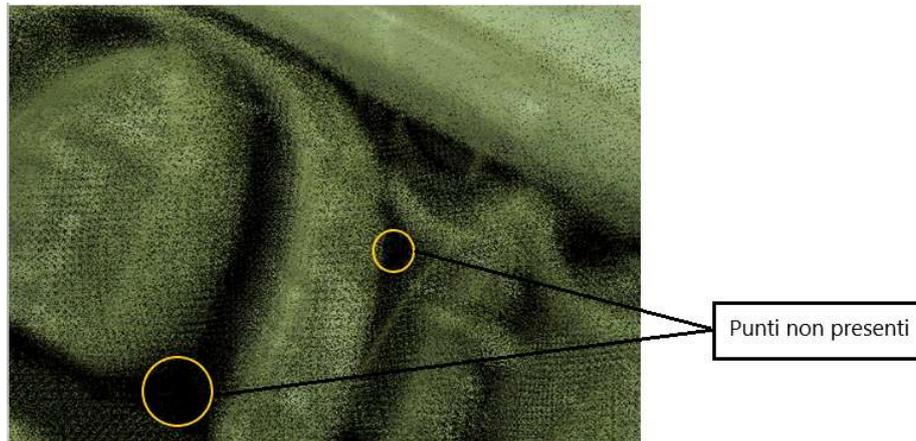
**Fig. 4.2.1.1** - Risultato della scansione n.1 con guadagno = 2 ed esposizione = 4

Eseguendo alcuni test dell'elaborazione si è notato inoltre che quella che richiede un maggior onere computazionale è la registrazione HQ anche se poi, come risultati non ci sono state apprezzabili differenze rispetto alle altre tipologie di scansione. E' da rilevare che il risultato è stato condizionato dalla batteria dello strumento in quanto nella prima scansione ha acquisito l'alimentazione dal PC attraverso la porta USB a causa della batteria non completamente carica. Nelle successive scansioni, per evitare problemi dipendenti dallo strumento, si è accertato che la batteria risultasse essere carica. Nella seconda scansione, nonostante la luce dell'ambiente fosse bassa, si è provato a non variare l'esposizione rispetto alla prima scansione impostando invece un guadagno pari a 8. In questo caso si è ottenuto un buon risultato (fig. 4.2.1.2).



**Fig. 4.2.1.2** - Risultato della scansione n.2 con guadagno = 8 ed esposizione = 4

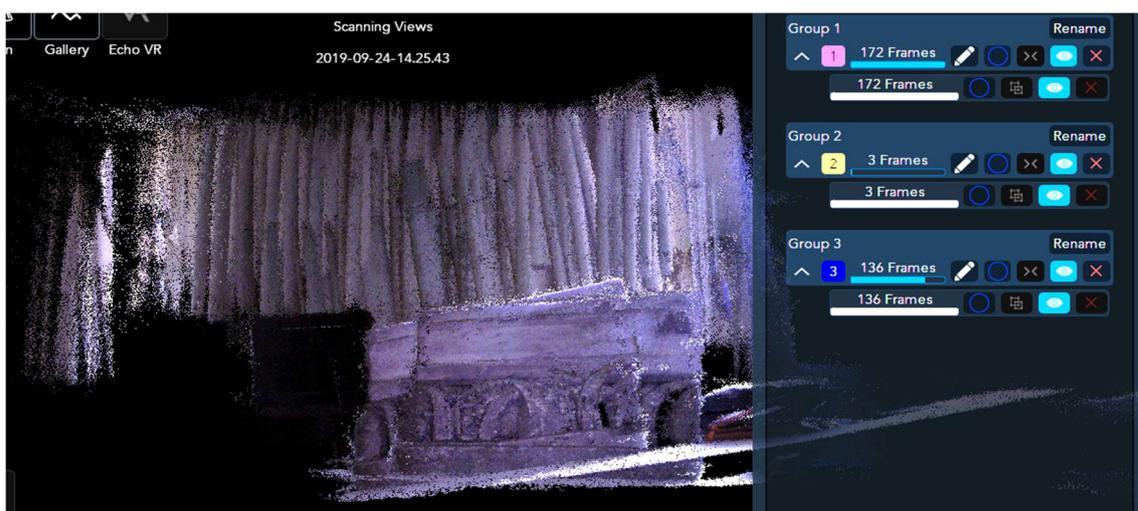
Per entrambe le scansioni lo strumento è stato posizionato ad una distanza di circa 50-60 cm che rappresenta la distanza minima richiesta dall'oggetto secondo le indicazioni della casa produttrice. Si è notato che allontanandosi dall'oggetto, la precisione con cui viene acquisita la nuvola di punti non ha avuto miglioramenti. Si può notare nella fig. 4.2.1.3 che la nuvola di punti non è presente nelle zone d'ombra difficilmente raggiungibili dal raggio infrarosso.



**Fig. 4.2.1.3** – Punti assenti in corrispondenza delle zone d'ombra più profonde

Un' ulteriore scansione è stata eseguita con la sola presenza di luce naturale.

Nella scansione n.3 la luce ambientale era quasi totalmente presente solo nella parte posteriore del rilievo; è stato fissato il guadagno adottato pari a 8 con un'esposizione medio-bassa pari a 4 mantenendo sempre inalterati i parametri di default e in automatico. Si è ottenuto un risultato finale molto simile alla prima scansione del giorno precedente (fig. 4.2.1.4) in cui sono stati generati 3 gruppi indipendenti tra di loro.



**Fig. 4.2.1.4** – Scansione n. 3 con gain=8 ed esposizione = 4

Si sono valutate due soluzioni per migliorare il risultato:

- eliminare due gruppi dei tre ottenuti mantenendo quello in cui si distingue l'oggetto rappresentato in maniera corretta. Questa soluzione ha permesso un miglioramento (fig. 4.2.1.5)
- lasciare i gruppi, andando ad utilizzare la registrazione automatica delle nuvole forzando l'unione tra i gruppi di nuvole, ma il software non è riuscito ad allinearle e ha creato più gruppi rispetto a quelli grezzi ottenuti dopo la scansione: risultato come in fig. 4.2.1.4.

Si osserva che i tempi di scansione per le prove sono stati mediamente dell'ordine di 30-40 sec (tab. 4.2.1.1) mentre i tempi di elaborazione variano da 5-10 minuti per una registrazione sequenziale o globale a 15-20 minuti per una registrazione HQ.



**Fig. 4.2.1.5** – Scansione n.1 rimuovendo 2 gruppi

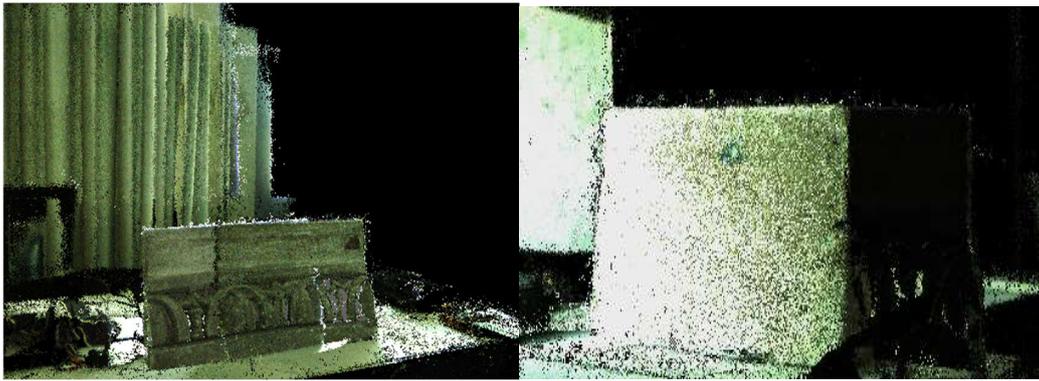
Scansione n.1			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
241	4,4 Mln	30 s	10 min
Scansione n.2			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
358	9 Mln	50 s	20-25 min
Scansione n.3			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
311	9 Mln	40 s	15 min

**Tab. 4.2.1.1** – Tabella dati scansioni con luce strutturata

## 4.2.2 – Scansioni a 360°

Queste prove, a differenza delle precedenti, sono state eseguite effettuando n. 3 scansioni a 360° ruotando attorno all'elemento architettonico.

Nella scansione n. 4 (fig. 4.2.2.1) si nota che sul retro del campione la nuvola di punti mostra una forte luminanza rispetto alla parte anteriore in cui i colori risultano essere meno brillanti. In questo caso la nuvola risulta essere registrata non correttamente: il software ha generato un unico gruppo contenente tutti i frame della videoregistrazione con i punti posizionati in modo tale da mostrare un' immagine sdoppiata dell'oggetto.



**Fig. 4.2.2.1** – Scansione n.4 con gain = 8 e esposizione = 4

Nella scansione n. 5 (fig. 4.2.2.2) , utilizzando un guadagno basso pari a 2, aumentando l'esposizione da 4 a 7, si ottengono più o meno i medesimi risultati in termini di qualità mentre la luminosità complessiva in questo caso risulta più bassa e da questo si deduce che il parametro che più influenza la luminosità è il guadagno.



**Fig. 4.2.2.2** – Scansione n.5 con gain = 2 e esposizione = 7



**Fig. 4.2.2.3** – Scansione n. 6 correttamente rappresentato con gain = 8 e esposizione = 7

In questa serie di prove con scansioni a 360° si è ottenuto solo un gruppo, stando a significare che il software in tempo reale è riuscito già ad allineare le diverse nuvole di punti ottenute dai frame della ripresa. Questo non significa che il risultato ottenuto sia corretto: in certi casi anche se il software genera un unico gruppo, a causa di variazioni di velocità di spostamento dello strumento durante la ripresa, i punti dell'oggetto possono risultare comunque sfasati tra di loro.

Inoltre facendo la registrazione (HQ o sequenziale) non cambia nulla rispetto al dato grezzo ottenuto al termine della registrazione del video. L'ultima scansione di prova è stata fatta prendendo in considerazione un guadagno alto=8 e un'esposizione medio-alta pari a 7 (fig. 4.2.2.3).

I tempi di scansione a 360°, rispetto alle prese solo frontali dell'oggetto, mediamente si mantengono uguali; mentre i tempi di elaborazione si incrementano arrivando a valori di circa 30 min (tab. 4.2.2.1)

Scansione n.4			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
314	9,6 Mln	40 s	25-30 min
Scansione n.5			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
359	12,3 Mln	50 s	30 min
Scansione n.6			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
281	10 Mln	30-40 s	30-35 min

**Tab. 4.2.2.1** – Tabella dati scansioni con luce strutturata

## 4.3 - Prova n.2: rilievo di un tavolo

Al fine di valutare le prestazioni che si possono ottenere scansionando oggetti con dimensioni maggiori rispetto all'elemento architettonico, in questa prova vengono analizzati i risultati ottenibili con lo strumento a luce strutturata relativi ad un tavolo presente in laboratorio (fig. 4.3.1).



Fig. 4.3.1- Foto tavolo analizzato

### 4.3.1 - Scansioni con F6 Smart

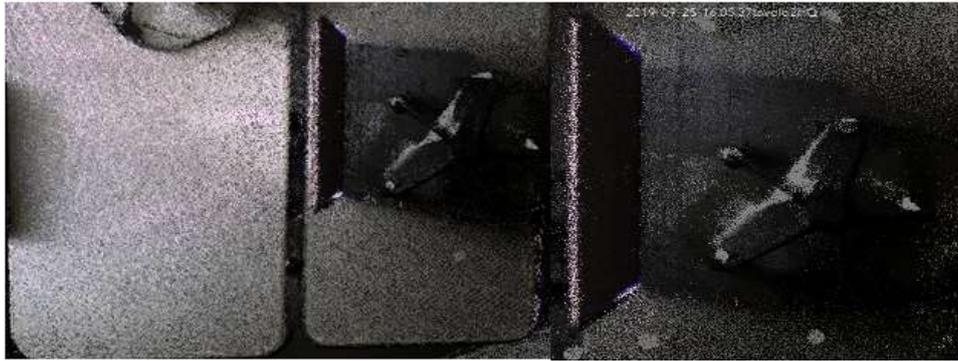
Si sono effettuate n.2 scansioni. In entrambe, sono stati impostati i parametri in modo automatico.

La scansione n.1 è relativa esclusivamente alla superficie superiore del piano del tavolo. Si sono ottenuti 2 gruppi di frame: poichè il risultato sembrava poter migliorare, si è deciso di provare a registrare la scansione per unire i due gruppi. In questo caso si è ottenuto un buon risultato (fig. 4.3.1.1)



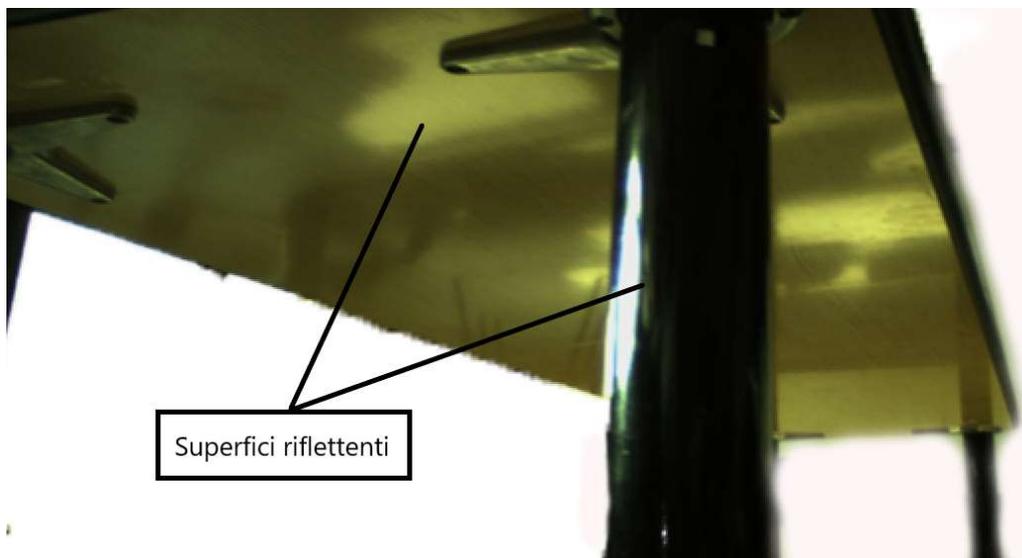
Fig. 4.3.1.1 – Risultato scansione n.1 del tavolo sul software ECHO

Si è notato però che le superfici riflettenti e curve, in particolare il bordo e le gambe del tavolo, non sono stati rappresentati per gran parte della loro estensione. Questo è evidenziato anche dal fatto che sul tavolo, dove è presente la tastiera del computer portatile costituita da una lega di alluminio molto riflettente, non è presente la nuvola di punti fig.(4.3.1.2).

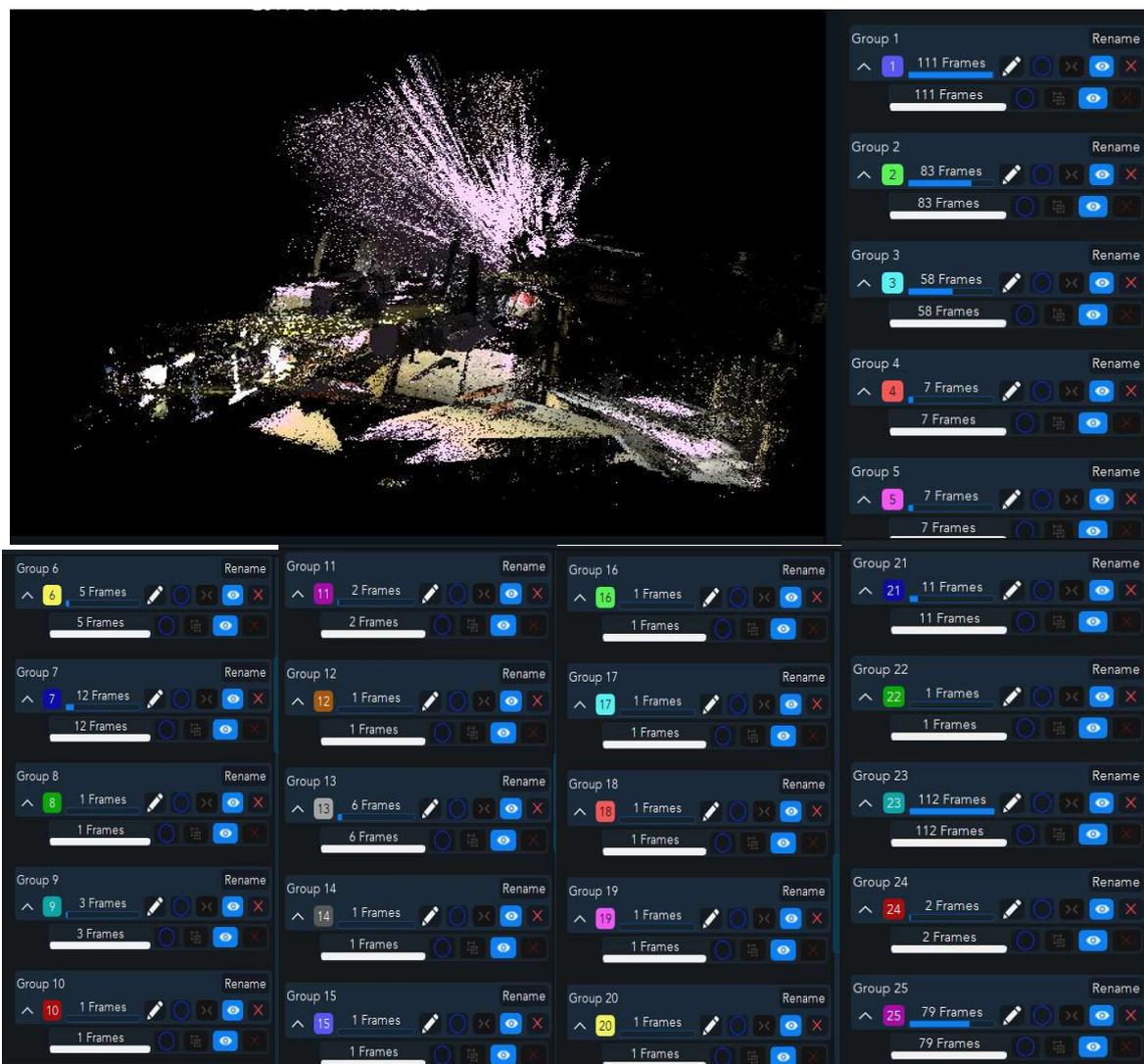


**Fig. 4.3.1.2** – Elemento ad alta riflettività (tastiera pc) non correttamente rappresentato

Nelle scansioni successive sono state riprese entrambe le superfici (inferiore e superiore) del piano, cambiando l'angolazione di ripresa al fine di verificare se lo strumento è in grado di ricreare il modello tridimensionale di oggetti con spessore esiguo. Sono state eseguite prove ripetute in quanto i risultati come da fig. 4.3.1.4 non si presentavano soddisfacenti. Nella fig. 4.3.1.4 si evidenzia che si sono ottenuti n.25 gruppi di frame in cui non si è riusciti a distinguere l'oggetto nella nuvola di punti. Questo perché, passando da una superficie all'altra durante la scansione, il software ha riconosciuto più oggetti diversi sfasati tra loro al posto di un unico oggetto. In particolare questo è probabilmente dovuto alla presenza di una superficie riflettente nella parte inferiore (fig. 4.3.1.3).



**Fig. 4.3.1.3** –Foto della scansione n. 2: lato inferiore riflettente



**Fig. 4.3.1.4** – Risultato ottenuto con n.25 gruppi di frame del tavolo scansionato con ECHO

Vengono riassunte nella Tab. 4.3.1.1 alcuni dati ottenuti dalle due scansioni effettuate.

Scansione n.1			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
482	16 Mln	60 s	30 min
Scansione n.2			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
509	17 Mln	1 min 05 s	20 min

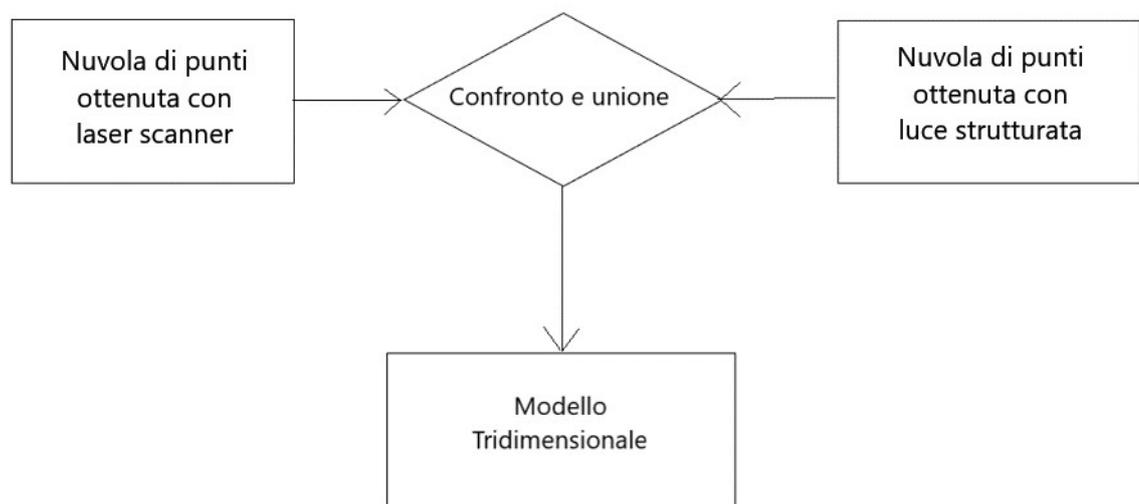
**Tab. 4.3.1.1** – Tabella dati scansioni con luce strutturata

#### 4.4 – Prova n.3: rilievo di una vetrina

L'oggetto delle prove consiste in una vetrina in legno affiancata ad armadi metallici.

Si effettuano prove per ottenere:

- Un confronto tra il modello “as built” 3D ottenuto mediante la nuvola di punti ottenuta con il laser scanner modello 3D FARO FOCUS 120s e la nuvola di punti ottenuta con l’F6 a luce strutturata.
- Un modello 3D maggiormente dettagliato che deriva dall’unione delle due nuvole.



**Fig. 4.4.1** – Schema a blocchi del procedimento utilizzato

La procedura di unione consiste nella eliminazione delle zone di rumore e i punti indesiderati presenti nelle due nuvole ottenute con il laser scanner FOCUS 3D e con lo strumento a luce strutturata.

Vengono rimosse tutte le superfici di sovrapposizione, in modo tale da ottenere un'unica nuvola dai due modelli al fine di ottimizzare il risultato finale utilizzando il software CloudCompare descritto nel paragrafo 5.1. Segue il confronto in termini di densità superficiale e di distanza tra le due nuvole.

#### 4.4.1 - Scansione con laser scanner FARO FOCUS 120s

Sono state eseguite n.3 scansioni in corrispondenza dell'oggetto in esame. Di seguito vengono riportati i parametri di settaggio dello strumento.

I parametri sono i seguenti:

- Durata scansione: circa 5 min
- Dimensioni scansione in numero di punti: 5120x2134
- Qualità: 3x
- Risoluzione: 1/8
- MPti: 10,9
- Distanza punto 12,272 mm/10 m



**Fig. 4.4.1.1** – Foto della vetrina e degli armadietti (a sinistra) e parametri utilizzati dal laser (a destra)

La scansione è durata complessivamente 15 minuti. Per la preparazione delle nuvole da inserire all'interno di CloudCompare, sono stati necessari 30-40 min (Tab. 4.4.1.1)

Scansioni laser scanner Focus			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
/	2,2 Mln	15 min	30-40 min

**Tab. 4.4.1.1** – Tabella dati scansione con laser scanner

#### 4.4.2 - Rilievo con luce strutturata F6 Smart

La scansione con l’F6 è stata effettuata impostando i parametri in modo automatico sul software ECHO. Una volta ricavata la nuvola di punti con un risultato già soddisfacente, un ulteriore miglioramento è stato ottenuto con la registrazione HQ; un’ ultima operazione di filtraggio è stata necessaria per eliminare il rumore dovuto a punti spuri. Il risultato finale è riportato in fig. 4.4.2.1.

Per la scansione si è impiegato un tempo di 50-60 secondi mentre per il trattamento della nuvola (registrazione e filtraggio) il tempo impiegato è stato di circa 40-45 min (tab. 4.4.2.1).



Fig. 4.4.2.1 - Nuvola filtrata ottenuta con luce strutturata F6

Scansione F6			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
463	16,2 Mln	50-60 s	40-45 min

Tab. 4.4.2.1 - Tabella dati scansione con luce strutturata

#### 4.5 - Prova n.4: rilievo di un cilindro con luce strutturata

In questo capitolo si crea il modello “as built” di un cilindro ideale utilizzando come campione un tubo portaprogetti in materiale plastico colore nero (fig. 4.5.1). La scansione è stata fatta a 360° in orizzontale e successivamente rielaborata con alcuni software che sono descritti nel paragrafo 5.1.

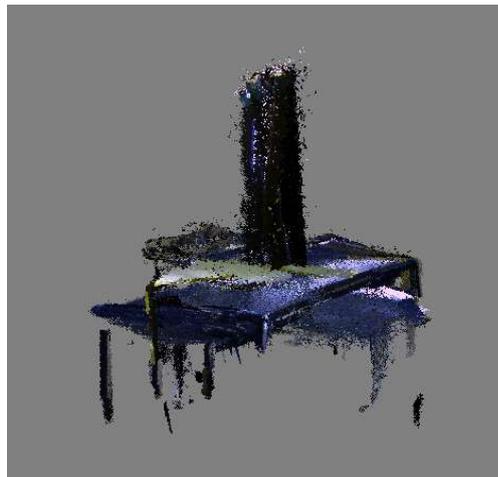
L’obiettivo principale consiste nell’ottenere un report in cui organizzare i risultati di diversi casi in cui si modifica la porzione del modello restringendo l’angolo di visuale con il software CloudCompare.



**Fig. 4.5.1** - Cilindro utilizzato nella prova

#### **4.5.1 - Scansione e relative problematiche**

Vengono illustrate le modalità e le problematiche riscontrate nell'esecuzione delle scansioni. Si osserva in primo luogo che purtroppo per un equivoco nell'utilizzo degli strumenti presenti in laboratorio, in una fase iniziale lo strumento F6 non era calibrato in quanto diverso da quello precedentemente usato: infatti il laboratorio dispone di due strumenti F6 uguali (fig. 4.5.1.1).



**Fig. 4.5.1.1** - Cilindro scansionato in maniera errata a causa della calibrazione non corretta

Superata questa fase iniziale sono seguite le prove di scansione a 360° in un piano orizzontale.

Come in altri casi la scansione è stata seguita da una registrazione HQ per migliorare il risultato finale. Nella zona di sovrapposizione dei punti della nuvola si era notato uno scostamento anche se limitato. La registrazione HQ ha permesso effettivamente di migliorare il risultato eliminando lo scostamento.

Infine è stata fatta una filtrazione per eliminare punti outliers. Sono stati impiegati circa 60 secondi per la scansione e circa 15 minuti per l'elaborazione con ECHO (tab. 4.5.1.1).

Scansione F6			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
374	1,5 Mln	40-50 s	15 min

**Tab. 4.5.1.1** - Tabella dati scansione con luce strutturata

#### **4.6 - Prova n.5: rilievo di tubazioni al primo piano**

Il caso successivo studiato è inerente alla creazione del modello “as built” di impianti costituiti da tubazioni degli impianti idraulici, del teleriscaldamento e di una conduttura elettrica installata a parete all'interno del dipartimento del DIATI del Politecnico di Torino.

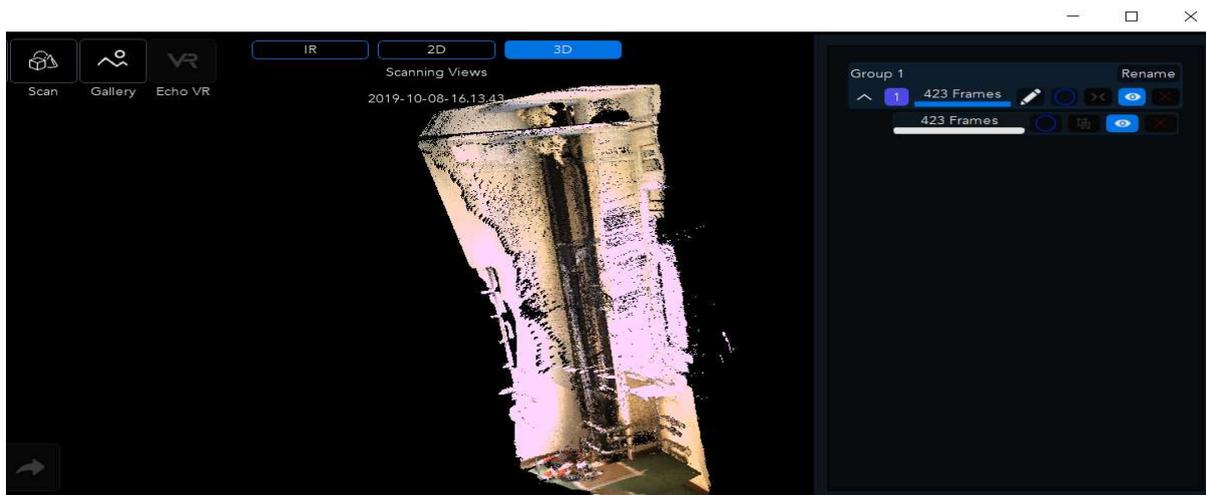
In questa serie di prove, a differenza delle precedenti, sono state effettuate delle misurazioni confrontando i risultati da nuvole di punti ottenute mediante lo strumento a luce strutturata F6 e i valori dei diametri delle tubazioni rilevati sul posto mediante un calibro.



**Fig. 4.6.1** - Tubazioni analizzate

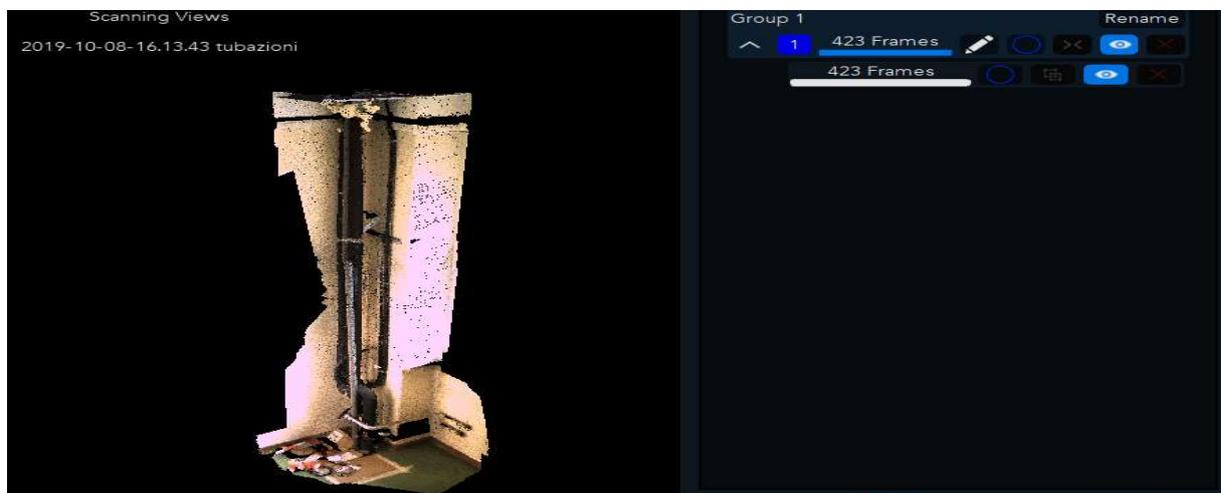
## 4.6.1 - Scansione con F6 Smart a luce strutturata

Il rilievo è stato effettuato con la luce strutturata utilizzando come strumento l’F6 Smart. Mediante il software ECHO descritto nel paragrafo 4.1, è stata effettuata una scansione impostando il guadagno e l’esposizione in modo automatico, in quanto l’oggetto era situato in prossimità di una fonte di luce naturale. Si è ottenuto un buon risultato per quanto riguarda i dettagli (fig.4.6.1.1), con un unico gruppo formato da 423 frame. La durata complessiva della scansione è stata di circa 1 minuto (tab. 4.6.1.1).



**Fig. 4.6.1.1** - Nuvola grezza acquisita durante la scansione

Al fine di migliorare la qualità è stata fatta inizialmente una pulizia manuale della nuvola utilizzando lo strumento di selezione messo a disposizione dal software ECHO, per rimuovere quei punti che risultavano sdoppiati (vedere parte alta dell’immagine precedente). Infine è stato effettuato un filtraggio automatico utilizzando la funzione “Denoising” presente nel programma. Il risultato ottenuto è decisamente migliore rispetto alla nuvola grezza (fig.4.6.1.2). La durata complessiva delle elaborazioni di registrazione e filtraggio con il software ECHO è stata di circa 25 minuti (tab. 4.6.1.1).



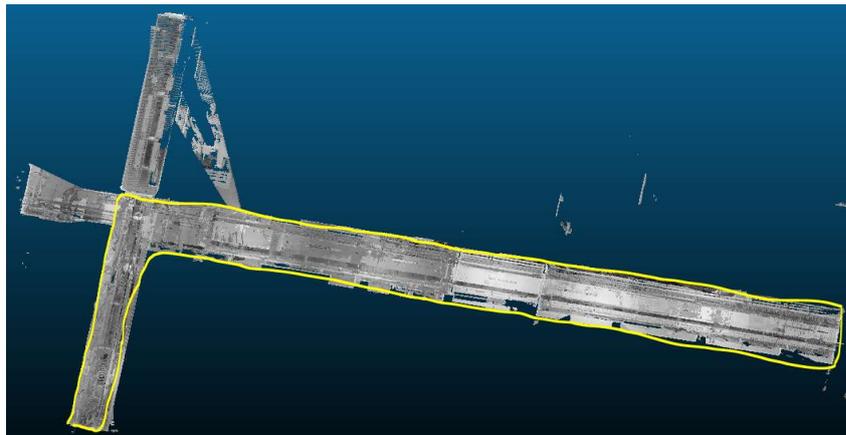
**Fig. 4.6.1.2** - Nuvola trattata con pulizia manuale e filtraggio automatico

Scansione F6			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
423	16,5 Mln	50-60 s	25 min

**Tab. 4.6.1.1** - Tabella dati scansione con luce strutturata

#### 4.7 - Prova n. 6: rilievo corridoio piano interrato del DIATI

In questo capitolo si descrivono le scansioni per ottenere il modello 3D “as built” delle tubazioni presenti sul soffitto del corridoio del DIATI del Politecnico di Torino. Gli strumenti utilizzati sono il lidar e lo strumento a luce strutturata F6. Scopo principale è valutare il comportamento degli strumenti, in particolare dell’F6, in un ambiente indoor di dimensioni maggiori rispetto ai casi già analizzati. Inoltre l’oggetto del rilievo si presenta con notevoli variazioni di luminosità dovuta all’illuminazione artificiale costituita da punti luce tra i quali vi sono delle zone meno illuminate. La valutazione dei risultati inizia con la verifica delle distanze tra le nuvole di punti ottenute con il Lidar e con l’F6. Nella seconda parte si valutano i parametri geometrici delle tubazioni utilizzando diversi software di elaborazione. Questo in particolare viene fatto in un certo numero di zone situate in prossimità di alcune sezioni trasversali del corridoio.



**Fig. 4.7.1** - Porzione di corridoio analizzata evidenziata in giallo



**Fig. 4.7.2** – Soffitto corridoio lungo 12 metri (sinistra) e lungo 30 metri (destra)

### 4.7.1 - Scansione con la luce strutturata

Si precisa che la scansione con lo strumento F6 è stata fatta percorrendo il corridoio in un unico verso, in quanto il software ECHO descritto nel paragrafo 4.1 non è in grado di allineare perfettamente le nuvole acquisite di in un percorso di andata e ritorno durante il procedimento di registrazione online. In questo caso si creano degli sfasamenti che difficilmente possono essere rimossi utilizzando la funzione di rimozione di singoli frame mediante l'apposita funzione presente nel software. La scansione è stata fatta impostando un guadagno pari a 8 e un'esposizione medio alta (pari a 6) a causa della presenza di zone con scarsa illuminazione. Sono stati impiegati circa 5 minuti per la scansione e circa 60 minuti per l'elaborazione con ECHO (Tab. 4.7.1.1).



**Fig. 4.7.1.1** – Nuvola di punti ottenuta con F6

Scansione F6			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
2201	56,4 Mln	4-5 min	50-60 min

**Tab. 4.7.1.1** – Tabella dati scansione con luce strutturata

## 4.7.2 - Scansione con il laser scanner

Le scansioni con il LIDAR sono state effettuate posizionando lo strumento in n. 8 punti di presa differenti lungo lo sviluppo del corridoio, di cui n. 3 nel corridoio con L=12m e n. 5 nel tratto con L=30m.

I parametri che sono stati impostati sono i seguenti (fig. 4.7.2.1):

- Durata scansione: circa 6 min
- Dimensioni scansione in numero di punti: 5120x2134
- Qualità: 4x
- Risoluzione: 1/8
- MPti: 10,9
- Distanza punto 12,272 mm/10 m

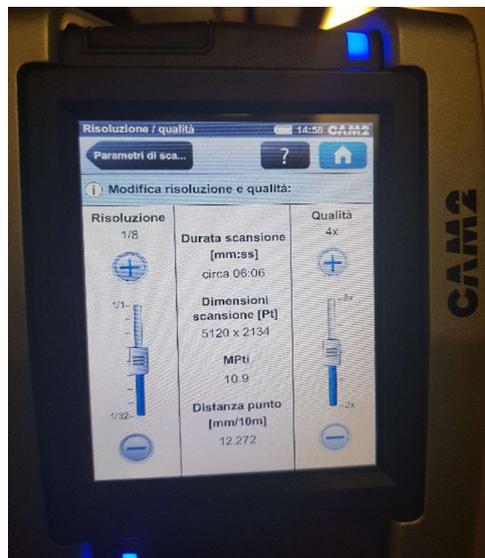


Fig. 4.7.2.1 – Settaggi di impostazione del laser scanner

Il tempo complessivo per le scansioni è stato pari a 45 minuti mentre per l'elaborazione il tempo complessivo è stato di circa 40 minuti.

Scansioni laser scanner Focus			
N.frame	N.punti	Tempi scansione	Tempi elaborazione
/	40 Mln	45-55 min	35-40 min

Tab. 4.7.2.1 – Tabella dati scansione con laser scanner

## Capitolo 5 Elaborazione dati ed analisi dei risultati

### 5.1 - Software di elaborazione

#### 5.1.1 - CloudCompare

Il software CloudCompare è un programma opensource che, attraverso un'ampia scelta di funzioni e comandi, permette di processare, gestire e modificare nuvole di punti di elevate dimensioni. Nato come strumento per eseguire dei confronti tra nuvole di punti e mesh, è stato poi dotato di molteplici algoritmi che permettono di ricavare informazioni sulla distanza reciproca tra punti di nuvole diverse, di valutarne le caratteristiche geometriche e di effettuare numerosi calcoli di tipo statistico.

Il programma, che permette inoltre di gestire il colore delle nuvole importate e di generare ortofoto, si basa su una struttura denominata "octree" ovvero una struttura per rappresentazioni tridimensionali di tipo "ad albero" che presenta n. 8 nodi figlio per ogni nodo padre. Una delle particolarità di questo software è la presenza di "Scalar fields" (campi scalari): il programma genera una scala di colori RGB che viene direttamente associata alla distanza tra i punti delle due nubi messe a confronto.

#### 5.1.2 - Matlab

Matlab (abbreviazione di Matrix Laboratory) è una piattaforma di scripting (linguaggio di programmazione interpretato, ad alto livello) per automatizzare l'esecuzione di calcoli, creazione di algoritmi, sviluppo di tools e software anche con un ambiente grafico appoggiandosi ad una miriade di librerie e pacchetti (chiamati toolbox). Inoltre ha integrato al suo interno anche altri software complessi, come Simulink per la creazione e simulazione di modelli dinamici. Viene largamente utilizzato in diversi campi ingegneristici, disponendo di toolbox specifici per analisi delle Immagini, analisi dei segnali, strumenti statistici, plot di grafici ma anche da professioni non strettamente tecniche grazie alla semplicità di utilizzo e all'implementazione di diversi toolbox con GUI (Graphic User Interface).

#### 5.1.3 - 3DReshaper

3DReshaper è un software di facile utilizzo ed interamente dedicato all'elaborazione delle nuvole di punti. La versione standard comprende una vasta gamma di caratteristiche, tra cui:

- Elaborazione di nuvole di punti
- Elaborazione Mesh 3D
- Allineamento
- Comparazione e Stampa di report
- Sezioni e polilinee
- Scripting

Con 3DReshaper è possibile importare nuvole di punti, indipendentemente dalla loro origine e dalle dimensioni. Molti formati sono supportati in modo che il progetto sia compatibile con lo scanner o con altri software. Consente l'estrazione di forme geometriche (piani, cilindri, contorni, ecc.) direttamente da una nuvola di punti o mesh: utile per estrarre finestre su una facciata, controllare la regolarità in sezione di un serbatoio, la verticalità di un muro. 3DReshaper include un ambiente Javascript per scrivere le proprie funzioni per automatizzare le operazioni ripetitive. Questi comandi personalizzabili possono essere eseguiti in modalità automatica quando non viene dato alcun input dall'utente, né si vuole visualizzare il processo; oppure con una finestra di dialogo che contiene i parametri da impostare.

### **5.1.4 - Librerie PCL**

Le librerie Point Cloud (o PCL) sono un progetto aperto su larga scala per l'elaborazione di immagini 2D/3D e nuvole di punti. PCL è un framework, ovvero una piattaforma software che può essere implementata da parte del programmatore. Il framework PCL contiene numerosi algoritmi all'avanguardia, tra cui filtraggio, stima delle funzionalità, ricostruzione della superficie, registrazione, adattamento del modello e segmentazione. Questi algoritmi possono essere utilizzati, ad esempio, per filtrare gli outlier da dati rumorosi, unire le nuvole di punti 3D, segmentare le parti rilevanti di una scena, estrarre punti chiave e calcolare i descrittori per riconoscere gli oggetti nel mondo in base al loro aspetto geometrico e creare superfici da nuvole di punti e visualizzarle. PCL è multiplatforma ed è stato compilato e distribuito con successo su Linux, MacOS, Windows e Android / iOS. Per semplificare lo sviluppo, PCL è suddiviso in una serie di librerie di codici più piccole, che possono essere compilate separatamente. Questa modularità è importante per la distribuzione di PCL su piattaforme con vincoli computazionali o dimensionali ridotti.

### **5.1.5 - FARO Scene**

Il software SCENE è stato ideato specificamente per tutti i laser scanner Focus e di terze parti.

Elabora e gestisce i dati di scansione in modo efficiente e semplice utilizzando la registrazione in loco in tempo reale, il riconoscimento automatico dell'oggetto, la registrazione della scansione e il posizionamento. Genera dati di elevata qualità a colori in modo rapido e comodo, incorporando immagini dal posizionamento automatico delle scansioni con o senza target. Gli utenti possono iniziare immediatamente la valutazione e l'elaborazione eseguendo semplici misurazioni, creando magnifiche visualizzazioni in 3D o esportando in vari formati CAD o in nuvole di punti una volta. Inoltre SCENE presenta una visualizzazione in realtà virtuale di grande effetto, che consente agli utenti di immergersi e valutare i dati acquisiti in un ambiente immersivo di realtà virtuale.

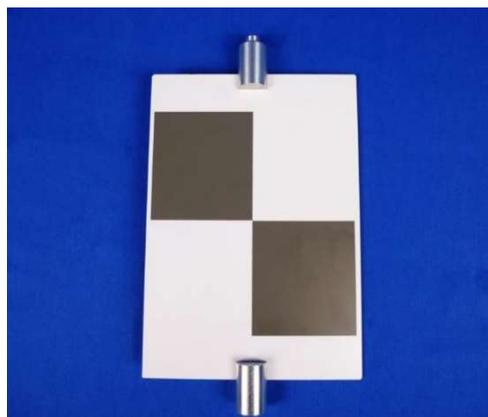
## 5.2 - Prova n.3: Confronto e analisi nuvole

Nel caso della vetrina presa in considerazione nel paragrafo 4.3, il software Cloudcompare ha permesso di effettuare dei confronti e l'unione di n. 4 nuvole di punti in un unico modello 3D: n. 3 nuvole ricavate con il laser scanner in tre scansioni successive variando il punto di presa e n. 1 nuvola ricavata da un'unica scansione con la luce strutturata variando la posizione dello strumento.

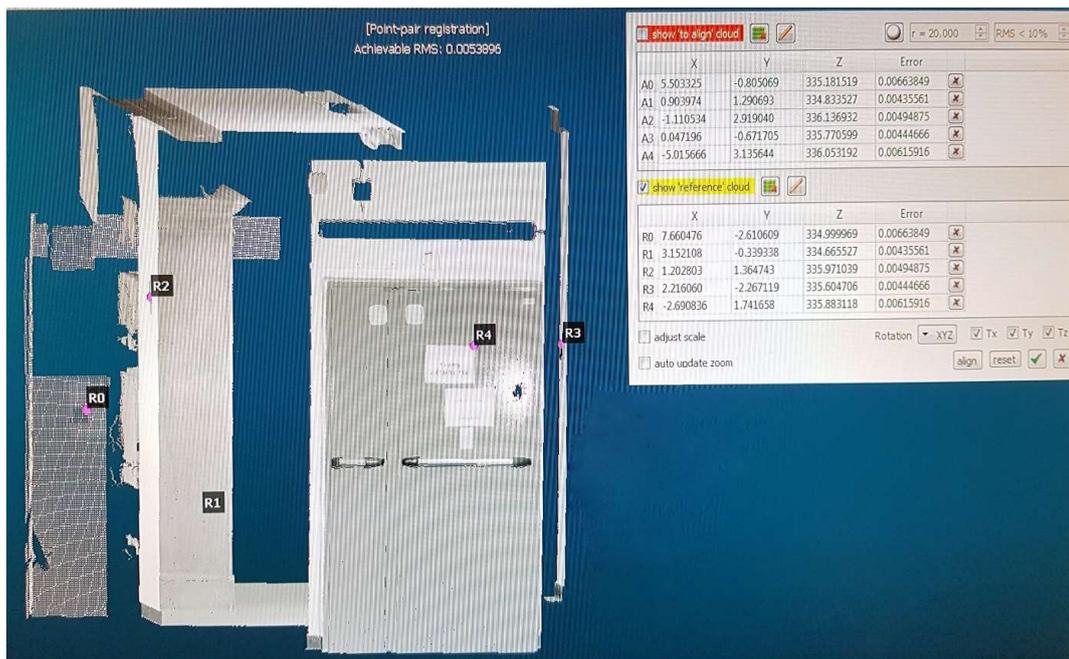
### 5.2.1 - Registrazione delle nuvole di punti

La prima operazione è stata quella di importare sul software CloudCompare le tre nuvole di punti ottenute con il laser scanner. Si è proceduto con l'allineamento delle prime due manualmente, e successivamente si è applicato l'algoritmo ICP (Iterative Closest Point). Si tratta di un algoritmo iterativo dove per prima cosa si calcolano le corrispondenze tra le scansioni che si vogliono confrontare e successivamente si minimizza l'errore di distanza per calcolare lo scarto fra le scansioni. al fine ottenere un'ottimizzazione della sovrapposizione delle nuvole. La corrispondenza tra i punti della scansione e i punti dell'immagine di riferimento viene effettuata attraverso la scelta del punto più vicino (Closest Point- fig.5.2.1.2).

La registrazione manuale si è basata sulla scelta di almeno n. 4 punti in comune alle due nuvole e questo è stato fatto grazie all'utilizzo di target (fig.5.2.1.1) posti in corrispondenza della zona analizzata. Si tenga conto che i target, per una corretta registrazione delle nuvole, non devono essere allineati tra di loro.



**Fig. 5.2.1.1** – Target utilizzati per la registrazione delle nuvole



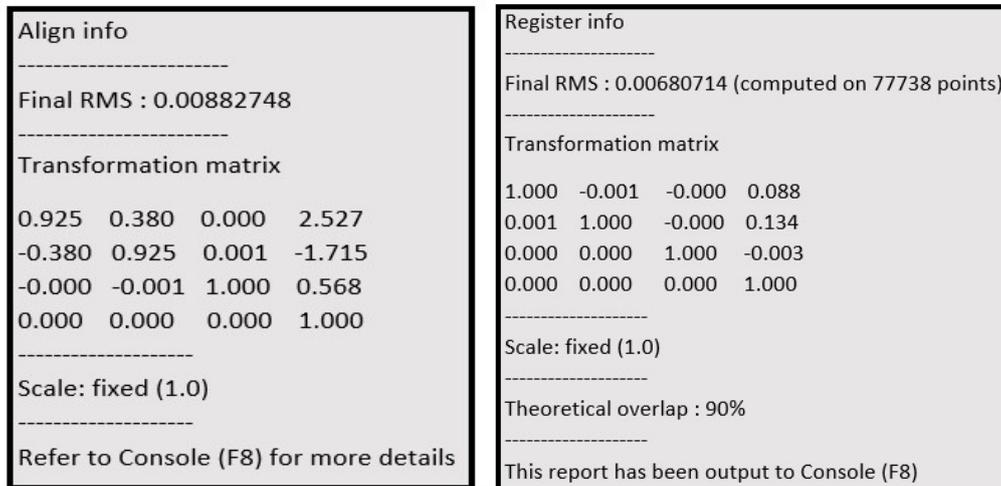
**Fig. 5.2.1.2** – Fase di allineamento nuvole per punti

Inizialmente il valore di RMS risultante dalla scansione ICP è più grande rispetto a quello ottenuto con la registrazione manuale. In particolare si ottiene un valore quadratico medio maggiore di 1 cm, valore troppo elevato per la scala dell'oggetto, imponendo una sovrapposizione teorica delle due scansioni minima pari all'80-90%. Al fine di ovviare a questo problema si sono segmentate ulteriormente le nuvole eliminando le zone presenti in una sola delle nuvole. Questo in quanto l'algoritmo calcola comunque la distanza dei punti da quelli più vicini dell'altra nuvola, causando un aumento dell'errore dovuto al discostamento delle nuvole. Il valore RMS risultante dalla scansione ICP si è abbassato passando a un valore quadratico medio pari a 0,6 cm (fig.5.2.1.3).

Align info	Register info
-----	-----
Final RMS : 0.00201016	Final RMS : 0.0062013 (computed on 88461 points)
-----	-----
Transformation matrix	Transformation matrix
1.000 -0.001 -0.000 0.078	1.000 0.000 -0.000 0.015
0.001 1.000 0.000 -0.117	-0.000 1.000 -0.000 0.106
0.000 -0.000 1.000 0.002	0.000 0.000 1.000 -0.000
0.000 0.000 0.000 1.000	0.000 0.000 0.000 1.000
-----	-----
Scale: fixed (1.0)	Scale: fixed (1.0)
-----	-----
Refer to Console (F8) for more details	Theoretical overlap : 90%
	-----
	This report has been output to Console (F8)

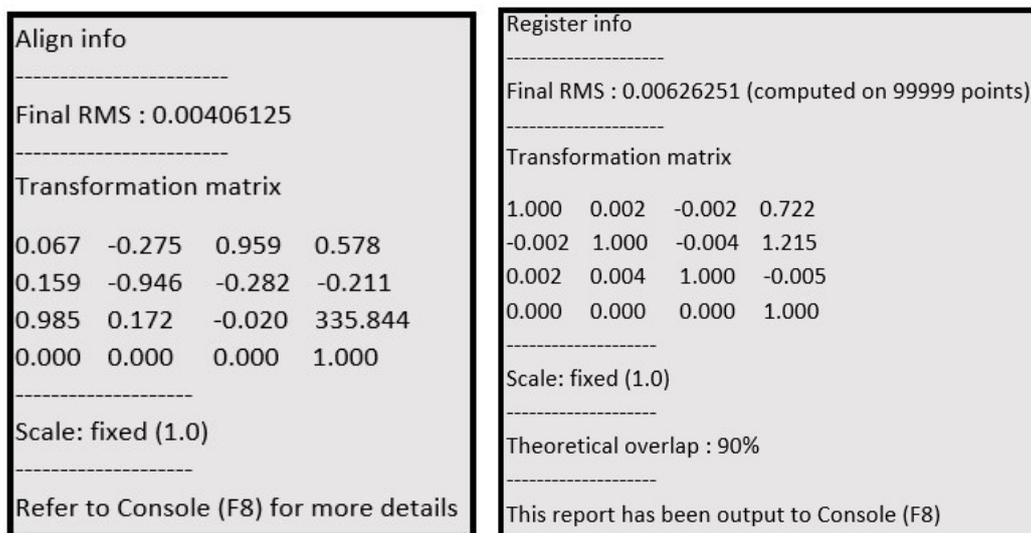
**Fig. 5.2.1.3** – Risultati RMS (Root Mean Square) dell'allineamento per punti (a sinistra) e allineamento ICP (a destra) delle prime due nuvole

Il passo successivo è stato quello di allineare le due scansioni precedentemente unite con la terza scansione importata. Anche in questo caso si è proceduto con una segmentazione delle nuvole per ridurre al minimo il calcolo del RMS (fig. 5.2.1.4).



**Fig. 5.2.1.4** – Risultati RMS (Root Mean Square) dell’allineamento per punti (a sinistra) e allineamento ICP (a destra) delle prime due nuvole già allineate con la terza

Il terzo passaggio è stato quello di importare la nuvola F6 per l’allineamento con la nuvola Lidar. Si è raggiunto un buon risultato in quanto lo scarto (fig.5.2.1.5) pari a 0,62 cm, è praticamente uguale a quello ottenuto tra le nuvole Lidar, compreso tra 0,62 e 0,68 cm (fig.5.2.1.3 e fig.5.3.1.4)



**Fig. 5.2.1.5** – Risultati RMS (Root Mean Square) dell’allineamento per punti (a sinistra) e allineamento ICP (a destra) della nuvola Lidar con la nuvola F6

Il risultato finale viene rappresentato di seguito (fig. 5.2.1.6).

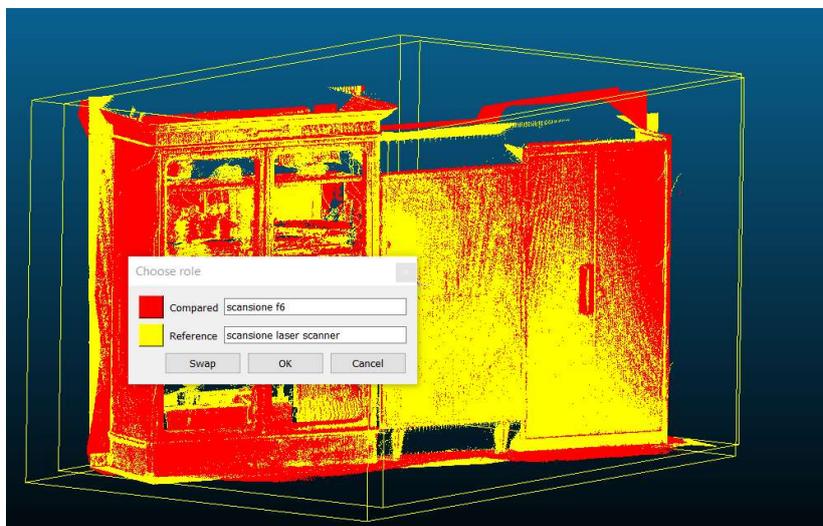


**Fig. 5.2.1.6** – Risultati allineamento nuvola lidar con nuvola F6 sul software CloudCompare

## 5.2.2 - Calcolo distanza media e confronto tra le nuvole

Un primo confronto tra le due nuvole è stato effettuato in riferimento alla loro distanza reciproca. Per fare ciò lo strumento più adatto, presente nella barra dei comandi, è “Cloud/Cloud dist.”

Attraverso questo comando è possibile, previa selezione delle due nuvole o parti di nuvole che si vogliono confrontare, computare la distanza effettiva tra i punti che le costituiscono. Il primo passaggio, valido per entrambe le superfici, è stato quello di isolare la porzione sulla quale andare ad effettuare il confronto attraverso l’apposito comando e solo successivamente avviando la procedura di “C2C” si andrà a selezionare la nuvola di riferimento (nel nostro caso la nuvola laser scanner) da cui computare la distanza (fig. 5.2.2.1).

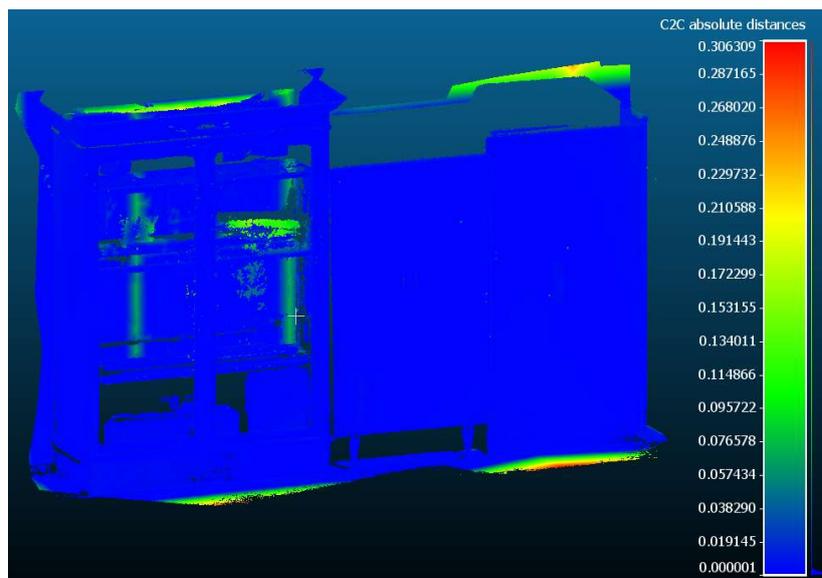


**Fig. 5.2.2.1** – Procedura C2C e scelta della nuvola di riferimento

Inizialmente il programma calcolerà delle distanze approssimate che permetteranno il settaggio dei parametri per la computazione effettiva della distanza tra le nuvole; in seguito a questa procedura automatica verrà visualizzata una finestra di dialogo nella quale sarà possibile modificare i suddetti parametri.

A questo punto il programma avvierà la fase di computazione e il risultato finale sarà rappresentato su una scala di colori RGB che va dal blu al rosso, passando per il verde, in funzione dello scostamento che c'è tra i punti delle due nuvole computate.

Di seguito vengono riportati e descritti i risultati ottenuti (fig. 5.2.2.2)



**Fig. 5.2.2.2** – Rappresentazione in scala RGB della distanza tra le due nuvole-la scala a destra è in metri

Analizzando l'immagine riportata si può notare:

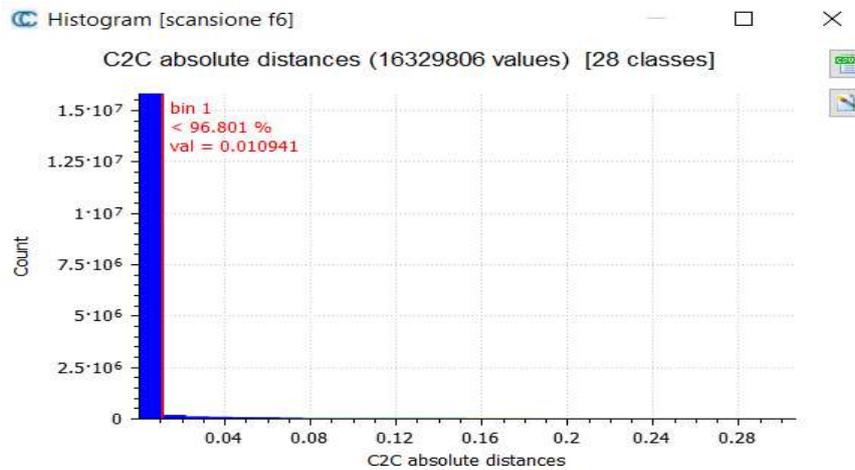
Le zone in blu costituiscono la quasi totalità della rappresentazione in scala RGB: quindi l'errore di distanza tra i punti è minimo (da circa 0 a 2cm: scala a destra nella figura 5.2.2.2) della rappresentazione.

- Gli errori più rilevanti (in rosso) sono visibili in prossimità delle zone in cui non c'è sovrapposizione delle nuvole in quanto la nuvola è stata precedentemente segmentata.
- Le distanze misurate risultano distribuite uniformemente ed inferiori ad 1 cm per il mobile a sinistra con ante vetrate.
- Nella parte destra dell'immagine, dove sono presenti gli armadi metallici, si sono ottenute distanze simili.
- Si è verificato che solamente in una zona limitata dell'anta di destra della vetrina il laser scanner

è riuscito a ottenere un insieme di punti della superficie vetrata; lo strumento a luce strutturata, al contrario, non è riuscito ad acquisire nulla di tale superficie trasparente.

- Esiste inoltre una differenza di acquisizione nei due strumenti per quanto riguarda la parete di fondo della vetrinetta. Lo strumento a luce strutturata, infatti, non essendo riuscito a rilevare correttamente gli oggetti all'interno della vetrina, può essere considerato poco idoneo per scannerizzare attraverso superfici trasparenti e riflettenti.
- Nei punti dove sono presenti le distanze più rilevanti (fig.5.2.2.2) sono attribuibili alle differenti caratteristiche tecniche dei due strumenti e alle differenti posizioni assunte durante le acquisizioni.

Il software CloudCompare permette inoltre di esportare gli istogrammi e le gaussiane dei risultati ottenuti:



**Fig. 5.2.2.3a** - Istogramma delle distanze dei punti tra le nuvole



**Fig. 5.2.2.3b** - Gaussiana delle distanze dei punti tra le nuvole

Nei due grafici di fig. 5.2.2.3a e fig.5.2.2.3b sono rappresentate sull'asse delle ordinate il numero di

punti dei valori delle distanze presenti sull'asse orizzontale.

Quello che si evince dalla valutazione dell'istogramma è che la maggior parte nel numero di punti che sono stati analizzati ricade nel range di errore compreso tra 0 e 1 cm mentre errori più grossolani risultano via via meno frequenti in modo molto marcato considerando distanze più rilevanti. In particolare l'istogramma in fig. 5.2.2.3a evidenzia che il 96,8 % dei punti delle due nuvole si trova nella prima fascia e quindi ad una distanza inferiore a 1,094 cm. Nel grafico della distribuzione statistica in fig. 5.2.2.3b si nota che il valor medio della distribuzione gaussiana assume il valore pari a 0,38 cm e la deviazione standard  $S_{qm}$  (scarto quadratico medio) è pari a 1,23 cm.

In questo caso il risultato può definirsi positivo in termini di confronto tra le nuvole ottenute con i due strumenti mediante la tecnica della luce strutturata, escluse le superfici vetrate e gli oggetti collocati oltre i vetri.

### **5.2.3 - Calcolo e confronto della densità superficiale**

Si confrontano le densità superficiale delle nuvole ottenute con i due strumenti.

La densità con il software CloudCompare utilizzato può essere calcolata con due metodi:

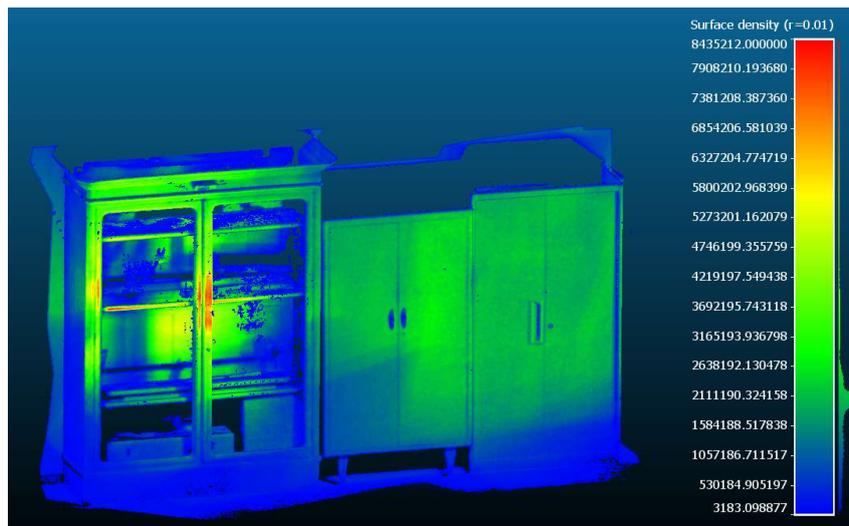
- Metodo Preciso: la densità viene stimata per ogni punto contando il numero di punti  $N$  situati all'interno di una sfera di raggio  $R$  impostato dall'utente. Il punto in esame è il centro della sfera di raggio  $R$ .
- Metodo Approssimato: la densità viene calcolata determinando in modo stimato la distanza dal punto più vicino 'Approssimativo': la densità viene semplicemente stimata determinando la distanza dal punto vicino all'interno di una sfera di raggio  $R$  impostato dall'utente. Quindi è un metodo più veloce.

Utilizzando il comando "Density", che può essere selezionato cliccando da "Tools" nella barra dei comandi, è possibile avviare la procedura di calcolo della densità della porzione di nuvola desiderata.

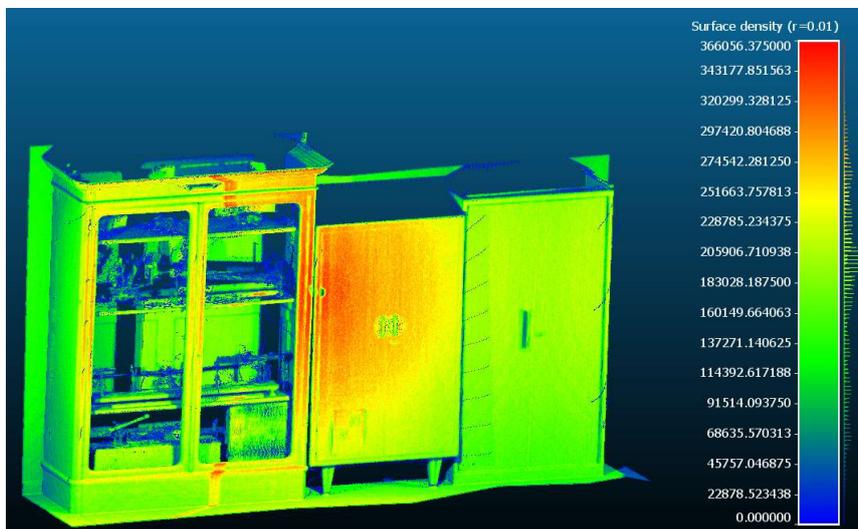
Si impostano:

- il raggio della zona da analizzare rispetto al generico punto in esame, in questo caso a 0,01 m scegliendo un valore in relazione alle distanze ricavate nel sottocapitolo precedente.
- il tipo di output che si vuole ottenere, in questo caso la densità superficiale.

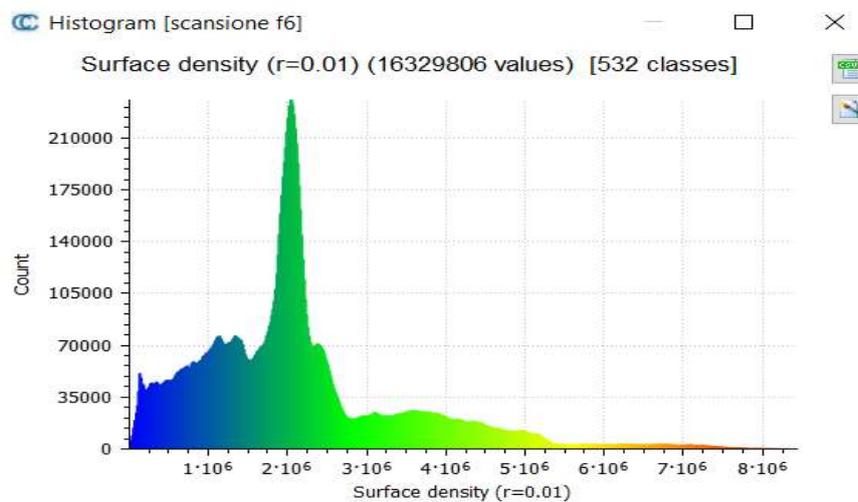
Di seguito vengono riportati e confrontati i risultati ottenuti dalla nuvola laser scanner e dalla nuvola F6 nel confronto Cloud to Cloud.



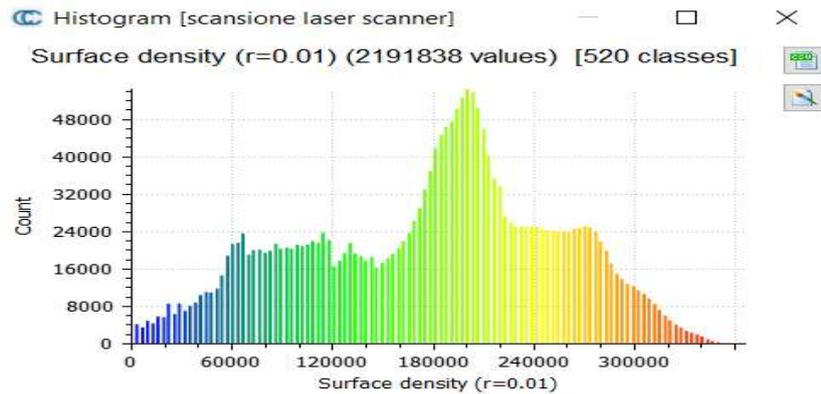
**Fig. 5.2.3.1** - Surface Density della nuvola F6



**Fig. 5.2.3.2** - Surface Density della nuvola laser scanner



**Fig. 5.2.3.3** - Istogramma della densità superficiale della nuvola F6



**Fig. 5.2.3.4** - Istogramma della densità superficiale della nuvola laser scanner

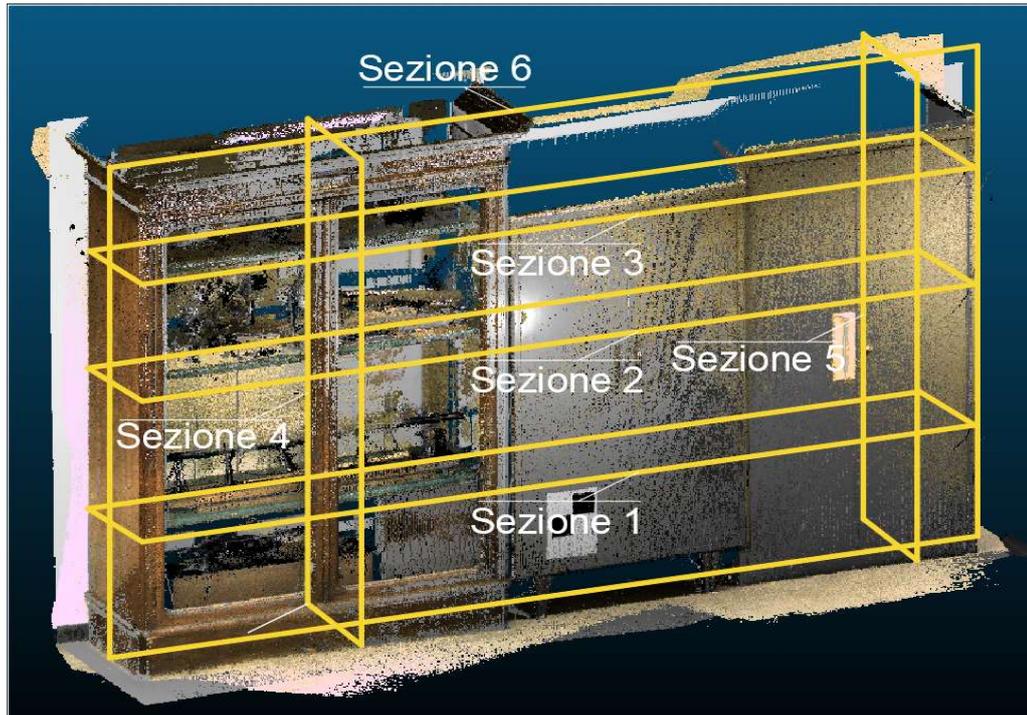
Annotiamo le seguenti considerazioni relative ai risultati:

- i punti delle nuvole non risultano omogeneamente distribuiti perché la disposizione spaziale varia in funzione della distanza tra lo strumento e l'oggetto scansionato. Analizzando i diagrammi riportati si può affermare che la densità della nuvola F6 risulta essere circa 8,5 volte superiore a quella del laser scanner.
- la nuvola F6 presenta una densità dei punti inferiore nella parte bassa dei mobili in quanto verso la pavimentazione è più difficoltoso scansionare con regolarità con lo strumento portatile, mentre la nuvola Lidar presenta una densità superficiale più uniforme rispetto allo strumento a luce strutturata probabilmente per il fatto che le tre nuvole Lidar, precedentemente registrate spazialmente si integrano a vicenda.
- Si nota anche che gli oggetti presenti all'interno della vetrina sono stati rappresentati meglio con il laser scanner in quanto la densità risulta maggiore rispetto alla nuvola F6.

## 5.2.4 - Calcolo distanze nuvole in alcuni punti

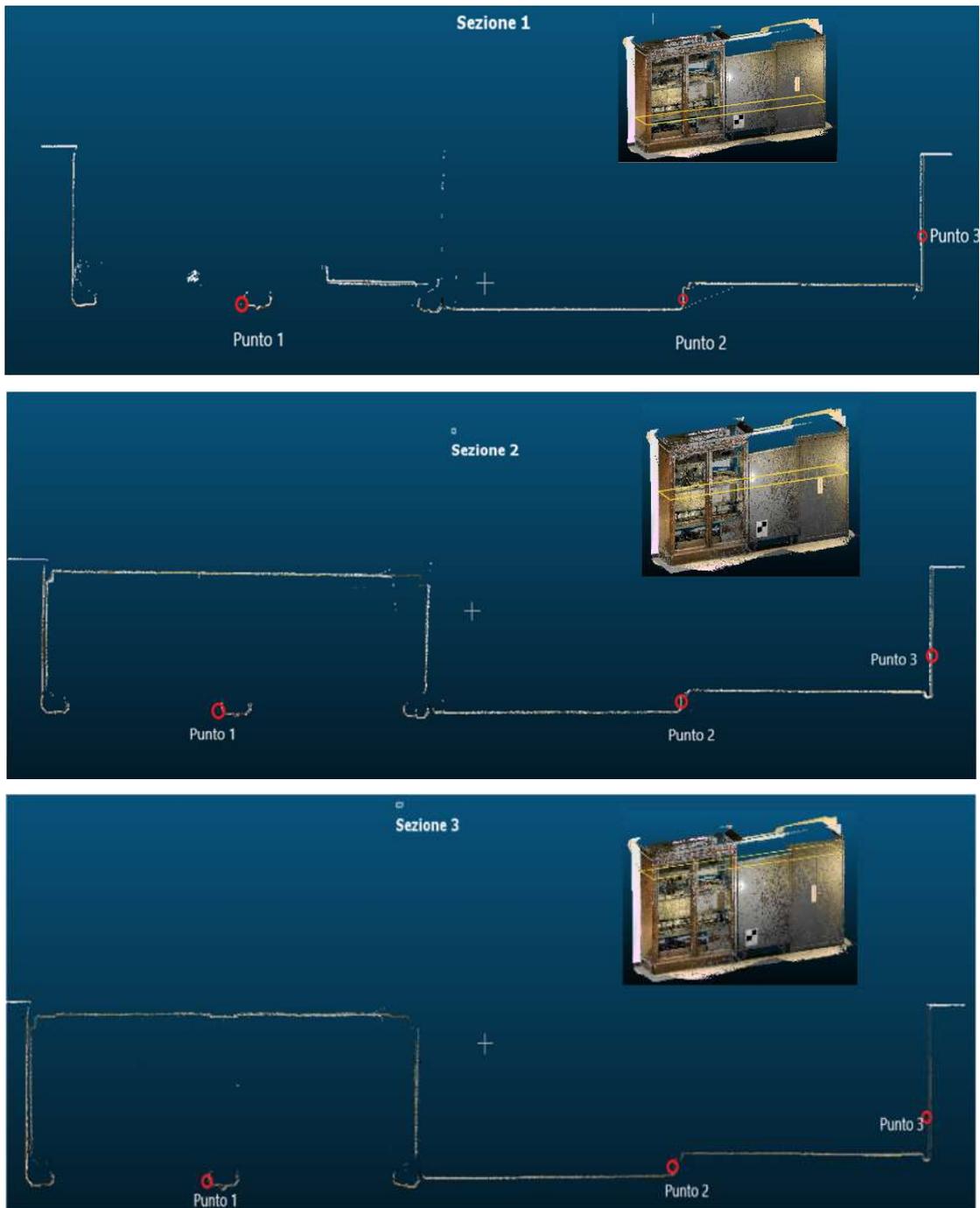
Si è deciso poi di analizzare alcune sezioni degli oggetti rappresentati per poter fare ulteriori misure: in alcune zone di tali sezioni vengono valutate le distanze tra i punti di due diverse nuvole rispettivamente del laser scanner e della luce strutturata

Nel modello 3D ottenuto precedentemente vengono individuate n. 3 orizzontali e n. 3 verticali come in fig. 5.2.4.1

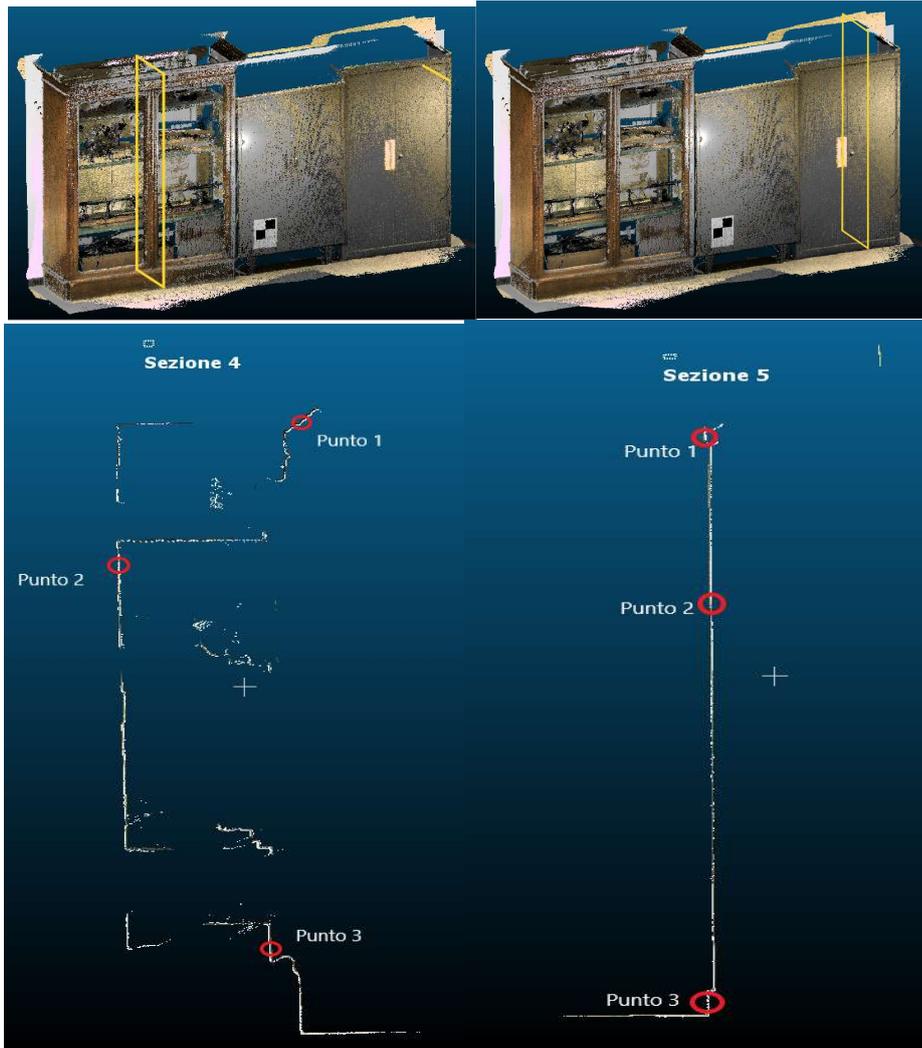


**Fig. 5.2.4.1** - Rappresentazione sezioni nel modello 3D

Nelle fig. re seguenti vengono riportate le nuvole delle sezioni analizzate con evidenziati i punti in cui sono state fatte le misure di distanza.

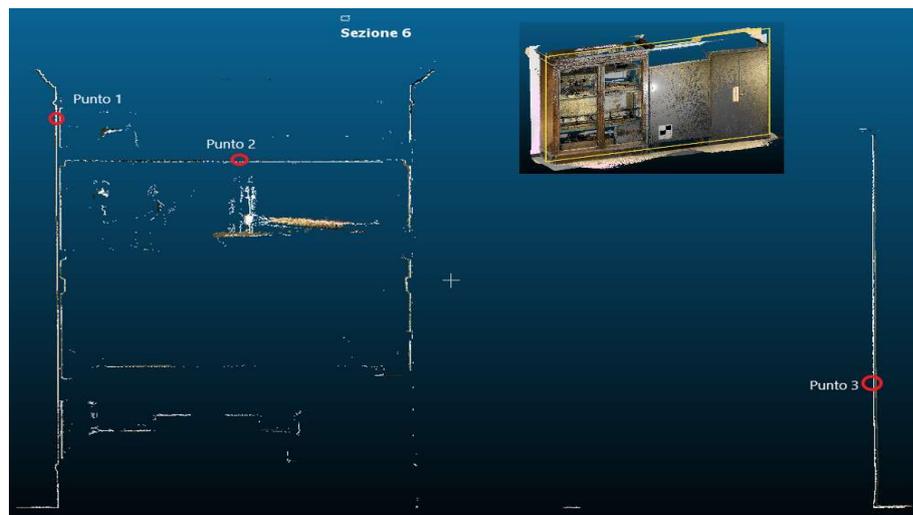


**Fig.5.2.4.2** - Sezioni orizzontali del modello 3D. In rosso sono evidenziati i 3 punti in cui si misurano le distanze tra le nuvole



**Fig.5.2.4.3** - Sezioni verticali trasversali del modello 3D.

In rosso sono evidenziati i 3 punti in cui si misurano le distanze tra le nuvole



**Fig.5.2.4.4** - Sezione verticale longitudinale del modello 3D. In rosso sono evidenziati i 3 punti in cui si misurano le distanze tra le nuvole

Un secondo confronto tra le due nuvole è stato effettuato in riferimento alla distanza reciproca tra nuvole analizzate a livello puntuale. Per fare ciò il comando del programma più adatto è “Cross Section”.

Con questo comando è possibile sezionare ogni singola parte della nuvola andando a modificare le dimensioni e la posizione del “box section” nello spazio. Per la realizzazione dei piani secanti la nuvola si è utilizzato uno “spessore” pari a 1 cm. Questo valore di “spessore” è stato scelto per un problema di misura della distanza: infatti posizionandosi su un generico piano parallelo al piano della sezione, selezionando i punti per effettuare la misura, se ne potrebbero rilevare alcuni che non stanno nel piano della sezione compromettendo così il risultato finale. Il comando “Point Picking” serve per la misura della distanza dopo aver scelto le due nuvole. Si scelgono tre punti per ogni sezione per calcolarne la distanza (Punti 1,2,3 nella tabella 5.2.4.1). I risultati vengono rappresentati in tabella.

Distanza punti sezioni [cm]			
Sezioni	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Sezione 1	0,493	0,791	1,216
Sezione 2	0,198	0,805	0,786
Sezione 3	0,31	0,615	0,94
Sezione 4	0,296	0,653	0,678
Sezione 5	0,202	0,193	0,213
Sezione 6	0,472	0,668	0,973

**Tab 5.2.4.1** - Tabella distanze punti nuvola Lidar da nuvola F6

Si rileva che le maggiori distanze tra i punti presi in esame sono situati nella parte destra dell’armadio metallico.

Questo è dovuto sostanzialmente al fatto che l’algoritmo ICP, quando allinea le nuvole, tenta di allineare tutti i punti delle due nuvole in modo da garantire la sovrapposizione massima desiderata (di solito comprese tra l’80 e il 95 %). Nella zona dell’armadio metallico i punti risultano maggiormente distanti tra loro rispetto al valore di RMS ottenuto al termine della registrazione ICP.

## 5.3 - Prova n.4: Elaborazione dati e analisi risultati

L'elaborazione delle nuvole ottenute con le procedure e gli strumenti descritti nel paragrafo 4.4 vengono elaborate con i seguenti software:

- Cloudcompare
- 3DReshaper
- Matlab
- Librerie PCL

### 5.3.1 - Elaborazione nuvola con CloudCompare.

La nuvola è stata esportata da ECHO con estensione .e57 e importata in CloudCompare : il software ha permesso di trattare la nuvola in diversi modi per ottenere diverse casistiche di studio.

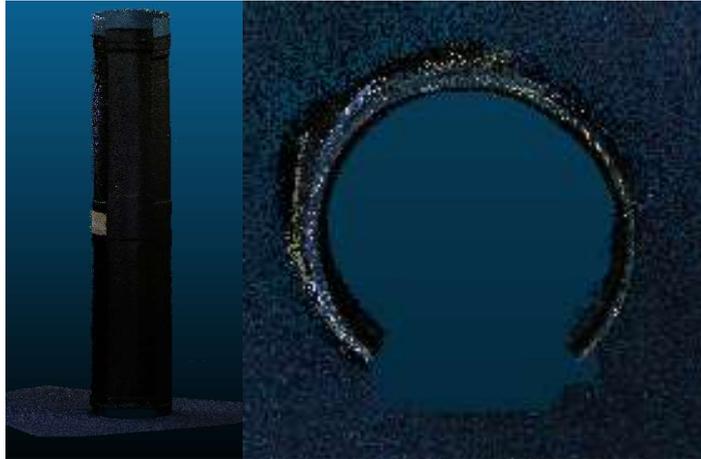
La nuvola in ingresso presenta un numero di punti pari a 1.635.695.

Dalla nuvola di partenza a 360° si ricavano quattro forme geometriche diverse per valutare come si comportano i software che verranno usati successivamente per ricavare i parametri del cilindro.

- Modello 3D 360°: 1.635.695 punti (fig. 5.3.1.1)
- Modello 3D 270°: 1.355.947 punti (fig. 5.3.1.2)
- Modello 3D 180° : 963.332 punti (fig. 5.3.1.3)
- Modello 3D 90°: 704.634 punti (fig. 5.3.1.4)
- Modello 3D 45°: 546.836 punti (fig. 5.3.1.5)



Fig. 5.3.1.1 - Modello 3D a 360°



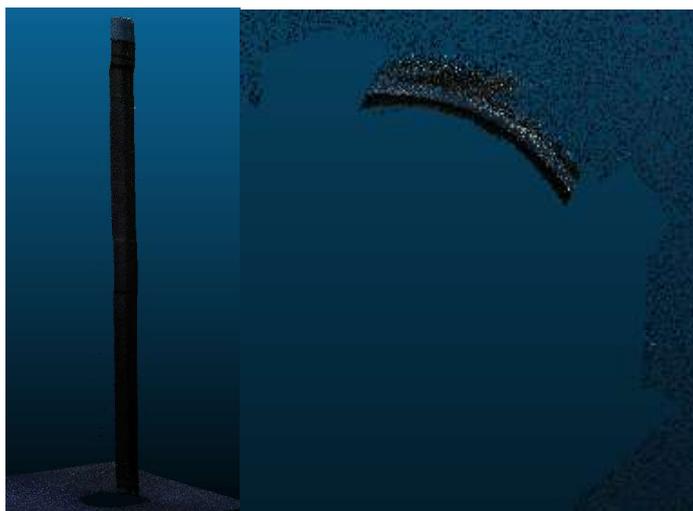
**Fig. 5.3.1.2 - Modello 3D a 270°**



**Fig. 5.3.1.3 - Modello 3D a 180°**



**Fig. 5.3.1.4 - Modello 3D a 90°**



**Fig. 5.3.1.5** - Modello 3D a 45°

La nuvola di punti è stata in seguito sottocampionata con CloudCompare con una spaziatura massima di 1 mm (i punti che si trovano a distanza minore vengono eliminati).

- Numero di punti con sottocampionamento della nuvola con spaziatura massima di 1 mm
- Modello 3D 360°: 199.005 punti
- Modello 3D 270°: 174.774 punti
- Modello 3D 180°: 129.154 punti
- Modello 3D 90°: 98.758 punti
- Modello 3D 45°: 85.014 punti

Si è poi fatto un sottocampionamento con spaziatura massima di 4 mm.

- Numero di punti con sottocampionamento della nuvola con spaziatura massima di 4 mm
- Modello 3D 360°: 13.510 punti
- Modello 3D 270°: 11.785 punti
- Modello 3D 180°: 9.028 punti
- Modello 3D 90°: 7.063 punti
- Modello 3D 45°: 6.084 punti

### 5.3.2 - Elaborazione nuvola con 3DReshaper

I modelli rappresentati dalle nuvole ricavate nel precedente paragrafo vengono utilizzati per elaborazioni con 3DReshaper.

Sono state importate ed elaborate 15 nuvole:

- n.5 nuvole risultanti da angolazioni diverse ( $360^\circ$   $270^\circ$   $180^\circ$   $90^\circ$   $45^\circ$ ) e non sottocampionate.
- n.5 nuvole risultanti da angolazioni diverse ( $360^\circ$   $270^\circ$   $180^\circ$   $90^\circ$   $45^\circ$ ) e dal sottocampionamento con spaziatura pari 1 mm.
- n.5 nuvole risultanti da angolazioni diverse ( $360^\circ$   $270^\circ$   $180^\circ$   $90^\circ$   $45^\circ$ ) e dal sottocampionamento con spaziatura pari a 4 mm.

Al fine di distribuire equamente le sezioni da analizzare, essendo il tubo lungo 80 cm, si è scelto di realizzare 9 sezioni con passo di 8 cm e con uno “spessore” del piano pari a 1 cm. In ogni sezione si ottengono le poligonali unendo all’interno della sezione stessa i punti delle 15 nuvole.

Si trovano le circonferenze che si adattano meglio alle poligonali trovate. Le figure seguenti (fig da 5.3.2.1 a 5.3.2.5) riportano le immagini delle circonferenze ottenute nel caso delle 5 nuvole con angolazioni diverse ma non sottocampionate prendendo come riferimento le densità dei punti maggiori. I risultati sono riportati in tabella in calce al sottocapitolo.

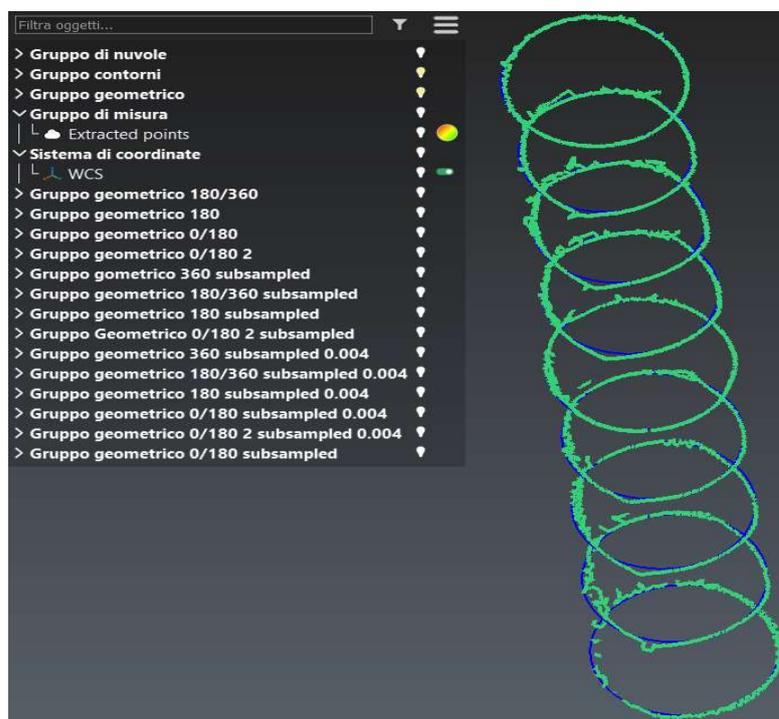


Fig. 5.3.2.1 - Sezioni del tubo a  $360^\circ$  non sottocampionate

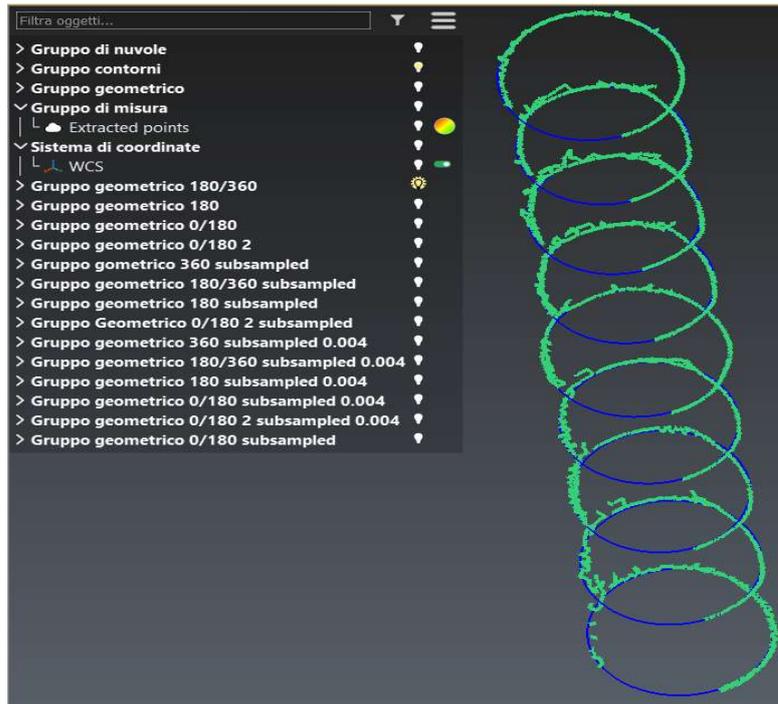


Fig.5.3.2.2 - Sezioni del tubo a 270° non sottocampionate

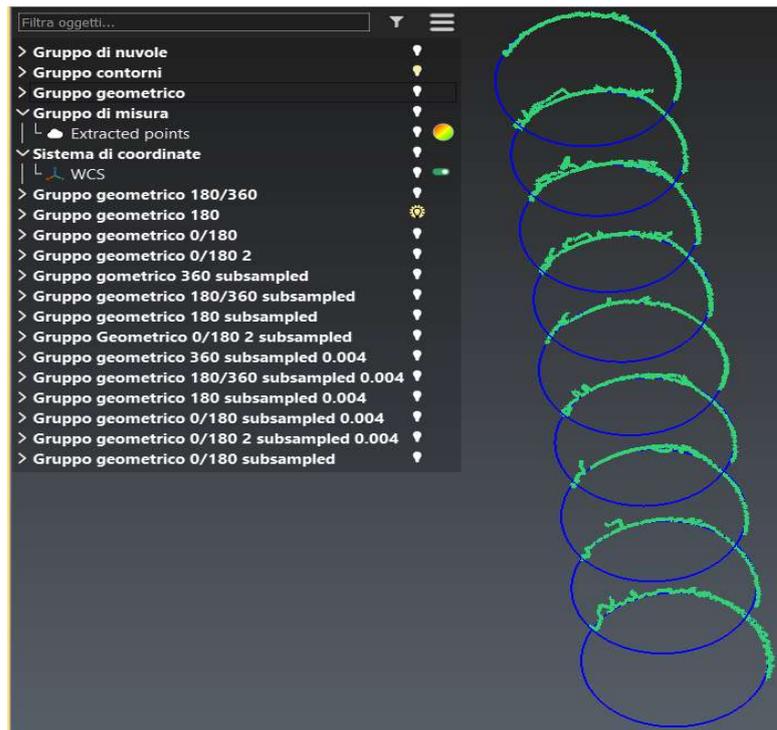


Fig. 5.3.2.3 - Sezioni del tubo a 180° non sottocampionate

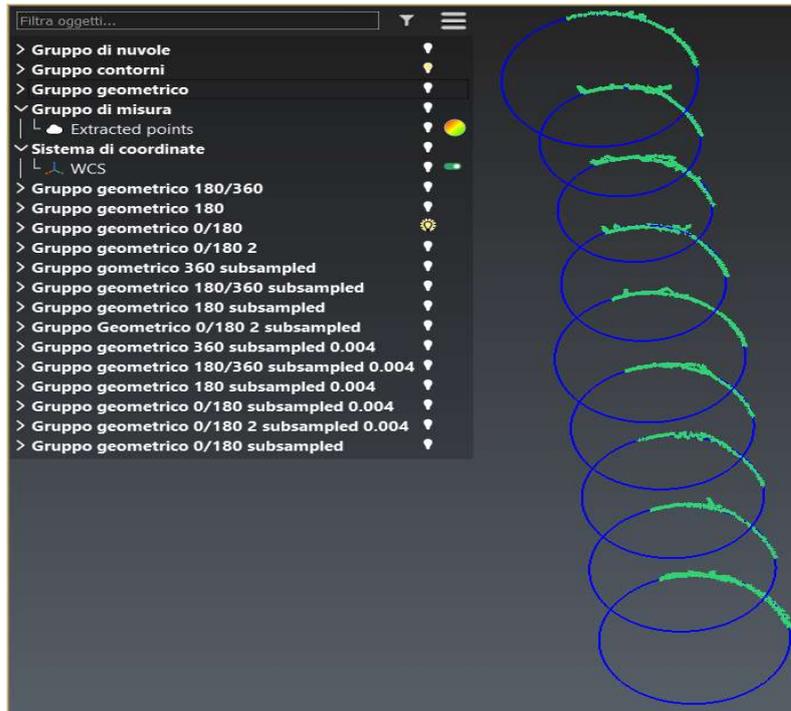


Fig. 5.3.2.4 - Sezioni del tubo a 90° non sottocampionate

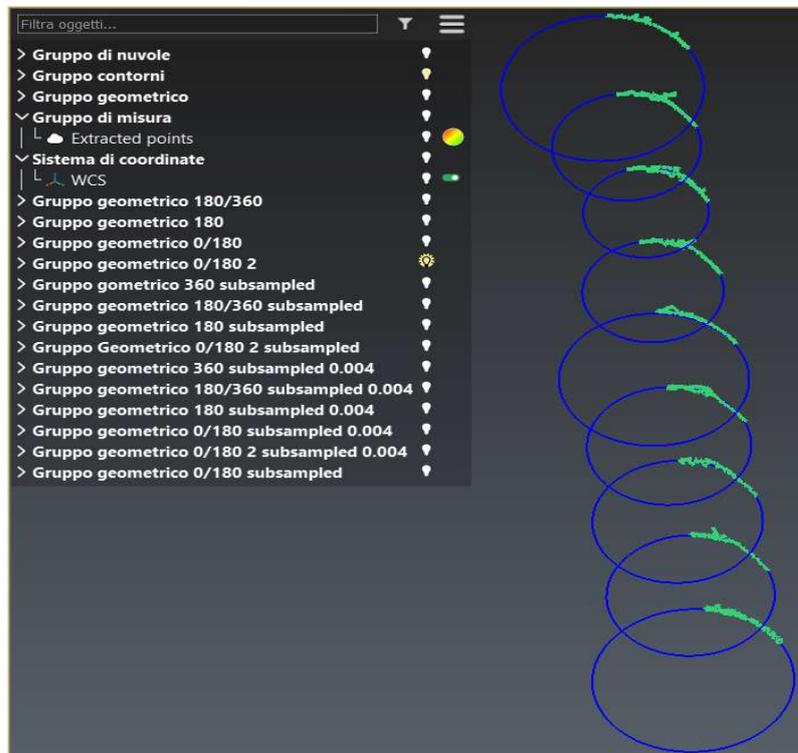


Fig. 5.3.2.5 - Sezioni del tubo a 45° non sottocampionate

### 5.3.3 - Elaborazione nuvola con Matlab

Viene utilizzato MATLAB con l'add-on Computer Vision Toolbox. ComputerVision Toolbox fornisce algoritmi e funzioni per la progettazione ed il collaudo di sistemi di elaborazione computerizzata, visione 3D e elaborazione video. È possibile eseguire il rilevamento e il tracciamento degli oggetti, nonché il rilevamento, l'estrazione e la corrispondenza delle funzioni. e elaborazione lidar e nuvola di punti 3D.

Viene spiegato il significato dello script riportato negli allegati. Come primo passaggio si è caricata la stessa nuvola di punti in formato .ply (fig 5.3.3.1) utilizzata con 3DReshaper. Si è scelta la coordinata (in questo caso l'ascissa) lungo l'asse del tubo in corrispondenza del piano di sezione in 3DReshaper. Con un apposito comando si è estratta l'informazione numerica delle coordinate x,y,z nello spazio rispetto a un sistema di riferimento locale generato dal software ECHO al momento della creazione della nuvola. Dopo aver riordinato i valori della matrice delle coordinate rispetto alla coordinata x, si è creato un doppio ciclo annidato in modo da ottenere tutti i parametri necessari (fig. 5.3.3.2). Il risultato finale viene memorizzato nella variabile Final che deriva dalla funzione CirclefitbyPratt (All. to n.1)

Viene riportato il codice Matlab negli allegati (All. to n.2).

I risultati del raggio del cerchio sono riportati nel paragrafo 5.3.5 in tabella, mentre le coordinate del centro del cerchio rispetto al SdR locale sono riportati nella tabella negli allegati (All. to n.5)

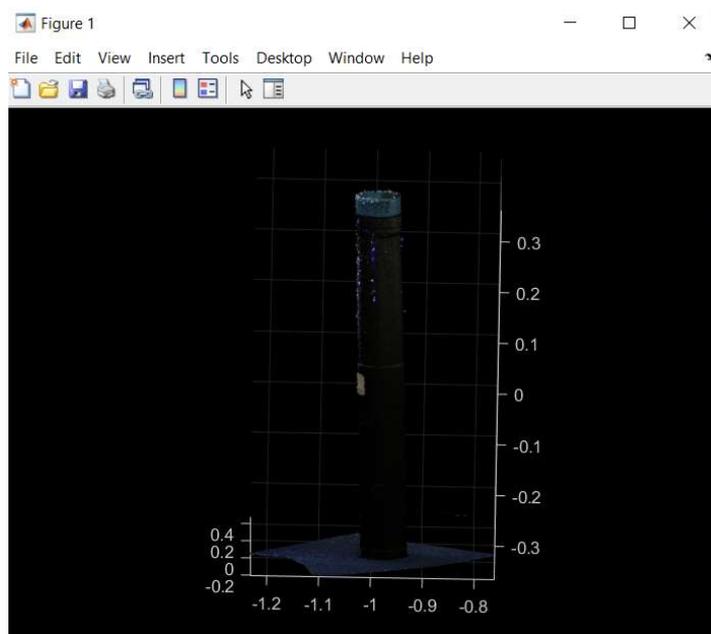


Fig. 5.3.3.1 – Cilindro ideale importato su Matlab

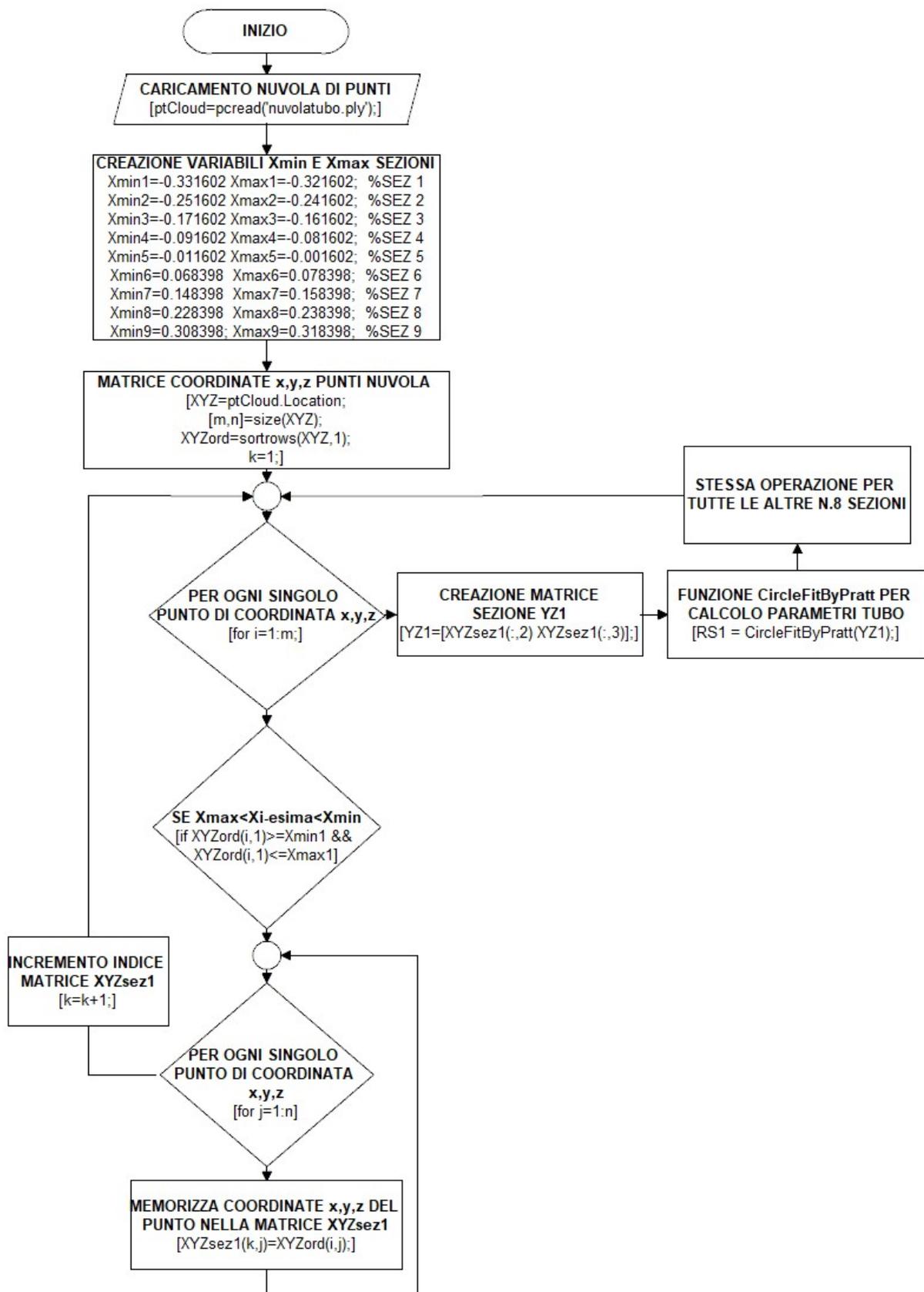
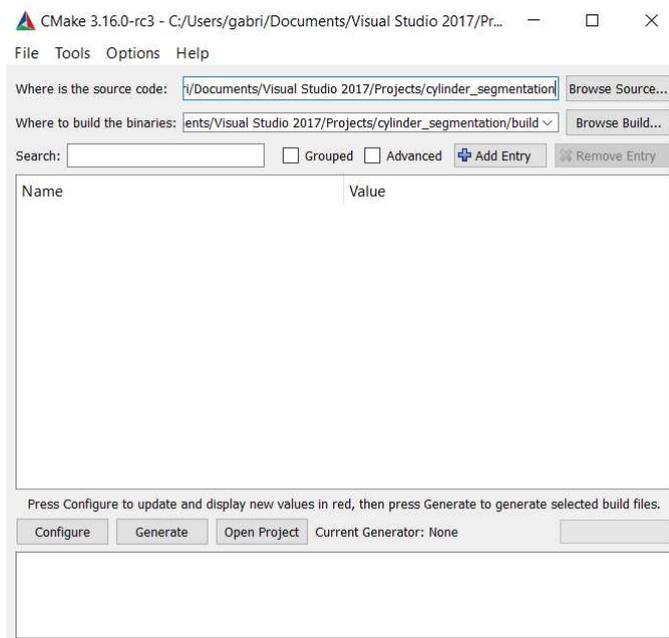


Fig. 5.3.3.2 – Diagramma di flusso script Matlab

### 5.3.4 - Elaborazione nuvola con PCL e Microsoft Visual Studio

Il terzo software utilizzato è Microsoft Visual Studio 2017 prendendo in considerazione le librerie Point Cloud già descritte nel sottoparagrafo 5.1.4. Per poter utilizzare le librerie di PCL, che sono scritte in C++ in Microsoft Visual Studio, non è sufficiente aggiungerle, ma bisogna indicarne la posizione.

Questo compito è affidato al software CMake. In questa elaborazione verranno generati file tipo .vcproject che saranno poi aperti in Microsoft Visual Studio.



**Fig. 5.3.4.1** - Interfaccia software CMake

Una volta ottenuto il codice .vcproject, che viene memorizzato nella cartella Build all'interno del progetto, come mostrato nella foto in alto, si apre il file .vcproject all'interno di Microsoft Visual Studio. Microsoft Visual Studio (o più comunemente Visual Studio) è un ambiente di sviluppo integrato (Integrated development environment o IDE) sviluppato da Microsoft. Visual Studio è multilinguaggio e attualmente supporta la creazione di progetti per varie piattaforme, tra cui anche Mobile e Console. È possibile creare ed utilizzare estensioni e componenti aggiuntivi.

Visual Studio, supporta diversi linguaggi di programmazione tra cui C#, Visual Basic .Net e C++.

Visual Studio integra la tecnologia IntelliSense che permette di correggere eventuali errori sintattici, e anche alcuni logici, senza compilare l'applicazione, possiede un debugger interno per il rilevamento e la correzione degli errori logici nel codice in runtime e fornisce diversi strumenti per l'analisi delle prestazioni. Il debugging è tra le azioni più delicate da compiere mentre si sta creando

un'applicazione: commettere un errore (bug) durante la scrittura del codice è molto semplice e correggerlo può portare dei cambiamenti all'intera architettura dell'applicazione.

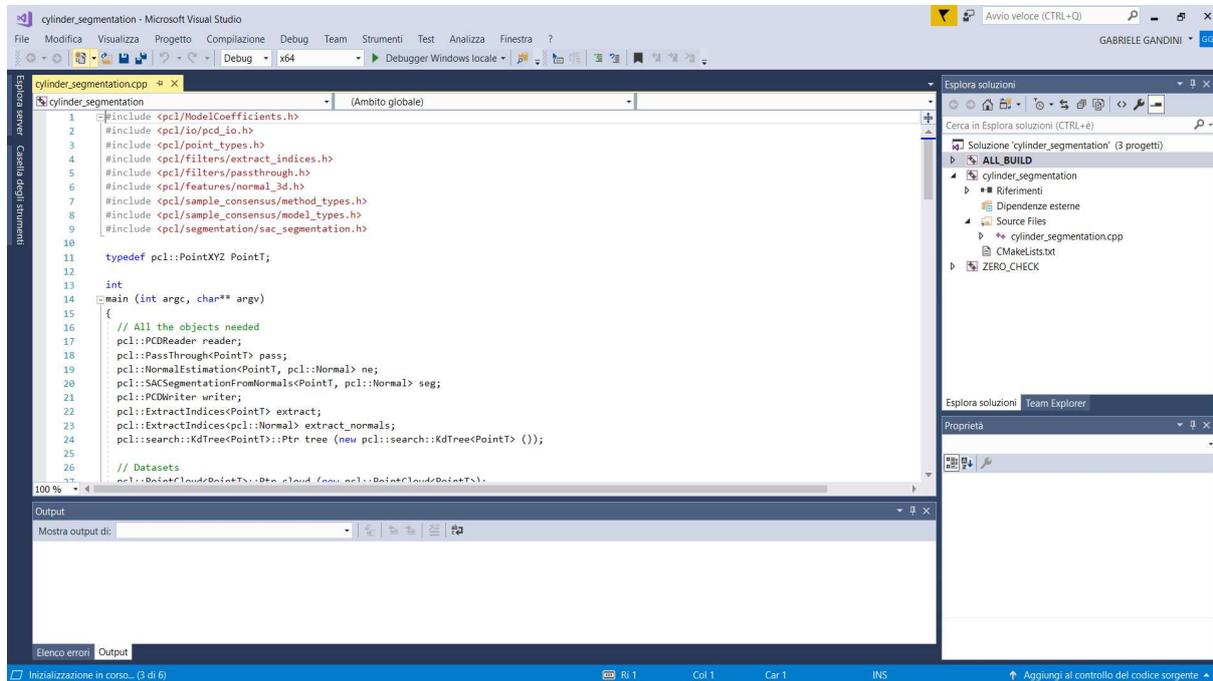
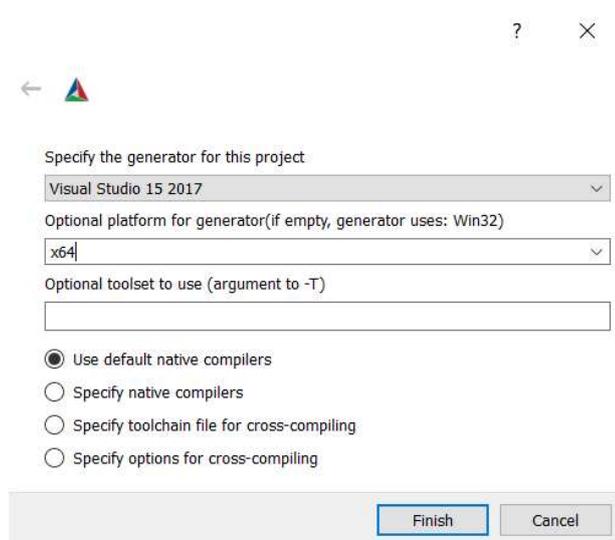


Fig. 5.3.4.2 - Interfaccia software Microsoft Visual Studio 2017

La versione utilizzata è la 2017 Community, che è gratuita per i singoli sviluppatori, usi accademici e open source.

Tornando al nostro caso, è stato utilizzato un codice di PCL scritto in C++, presente nei tutorial, per poter estrarre l'informazione cilindrica dalla nuvola di punti, estraendo come dati il raggio del cilindro e le coordinate del centro delle sezioni all'estremità del cilindro. Come primo passo si è andati a prendere il file con estensione .cpp e il file di CMake con estensione .txt all'interno della directory di PCL e si sono copiati all'interno della cartella di Visual Studio presente in documenti, per non rischiare di andare a modificare il file originario. Il passo successivo è stato quello di aprire il file con estensione .cpp con Visual Studio e si è andati a modificare il nome del file della nuvola di input di default con quello della nuvola salvata con CloudCompare con estensione .pcd (Point Cloud Data).

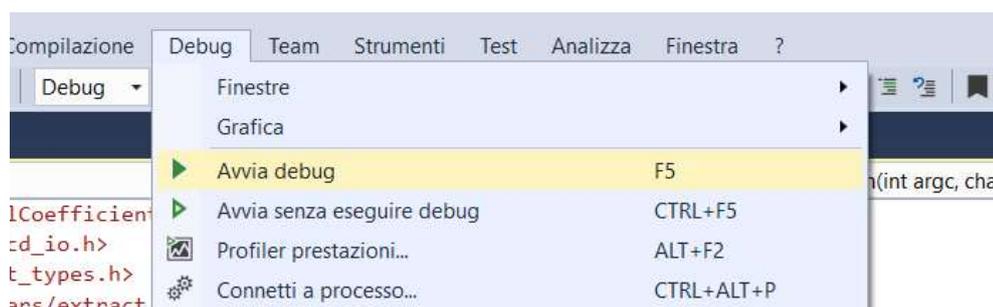
Si è aperto il software CMake, e nell'interfaccia principale si è selezionato come file sorgente il file .cpp. Si è creata la cartella di destinazione di nome "build" all'interno della directory di Visual Studio. Con il comando "Configure" si indica il software di destinazione ovvero il generatore del codice sorgente (Visual Studio 2017).



**Fig. 5.3.4.3** - Interfaccia software Cmake

CMake in questo modo rende fruibili all'interno del codice sorgente le librerie di PCL poste in differenti directory. Si entra nella cartella "build" dove sono stati generati i file e si utilizza il file di estensione .sln che rappresenta la soluzione pronta per essere compilata.

Si apre Visual Studio e si lancia la compilazione andando in alto nel menu Debug avviandolo.



**Fig. 5.3.4.4** – Avvio della compilazione del codice per generare il file eseguibile

All'interno della cartella "build" verrà creato in automatico una cartella Debug con all'interno l'eseguibile del programma con estensione .exe.

Relativamente ad ognuna delle 15 nuvole, viene eseguito il programma ottenendo in uscita i valori riportati dalla fig. 1 a fig.14 riportate negli allegati (All. to n.4). Viene riportato un esempio di output in fig.5.3.4.5. I primi 4 valori – values[0] a values [3] non sono di nostro interesse in quanto rappresentativi del piano sotto il cilindro. Nella seconda serie di valori da values[0] a values [5] sono le coordinate x,y,z dei centri delle circonferenze di base del cilindro, mentre il value[6] rappresenta il raggio medio calcolato considerando tutti i punti della nuvola. Viene riportato negli allegati (All. to n.3) il codice C++ utilizzato.

```

PointCloud has: 1635695 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999079
  values[1]: -0.042751
  values[2]: -0.00378535
  values[3]: 0.315785

PointCloud representing the planar component: 311107 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -0.0142141
  values[1]: -0.985208
  values[2]: -0.0178806
  values[3]: 0.999298
  values[4]: -0.0350981
  values[5]: -0.0131133
  values[6]: 0.0405394

PointCloud representing the cylindrical component: 1096318 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

Fig. 5.3.4.5 - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 360° senza sottocampionamento

PCL					
Tubo 360°			Tubo 270°		
N.punti	N.punti	N.punti	N.punti	N.punti	N.punti
1.635.695	199.005	13.510	1.355.947	174.774	11.785
Raggio [mm]					
40,5	41	41,3	41	40,6	40,8
Tubo 180°			Tubo 90°		
N.punti	N.punti	N.punti	N.punti	N.punti	N.punti
963.332	129.154	9.028	704.634	98.758	7.063
Raggio [mm]					
41,2	41,3	41,2	36,4	36,1	35,6
Tubo 45°					
N.punti	N.punti	N.punti			
546.836	85.014	6.084			
Raggio [mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]			
27,8	24,5	21,6			

Tab. 5.3.4.1 - Tabella risultati raggi tubo con PCL

Dalla tab. 5.3.4.1 si nota che a partire dalla nuvola di punti sviluppata a 90°, il raggio comincia ad avere un errore di 0,5 cm che si incrementa al diminuire del numero di punti.

Viene riportato di seguito il diagramma di flusso del codice scritto in C++ per ricercare i cilindri all'interno della nuvola di punti.

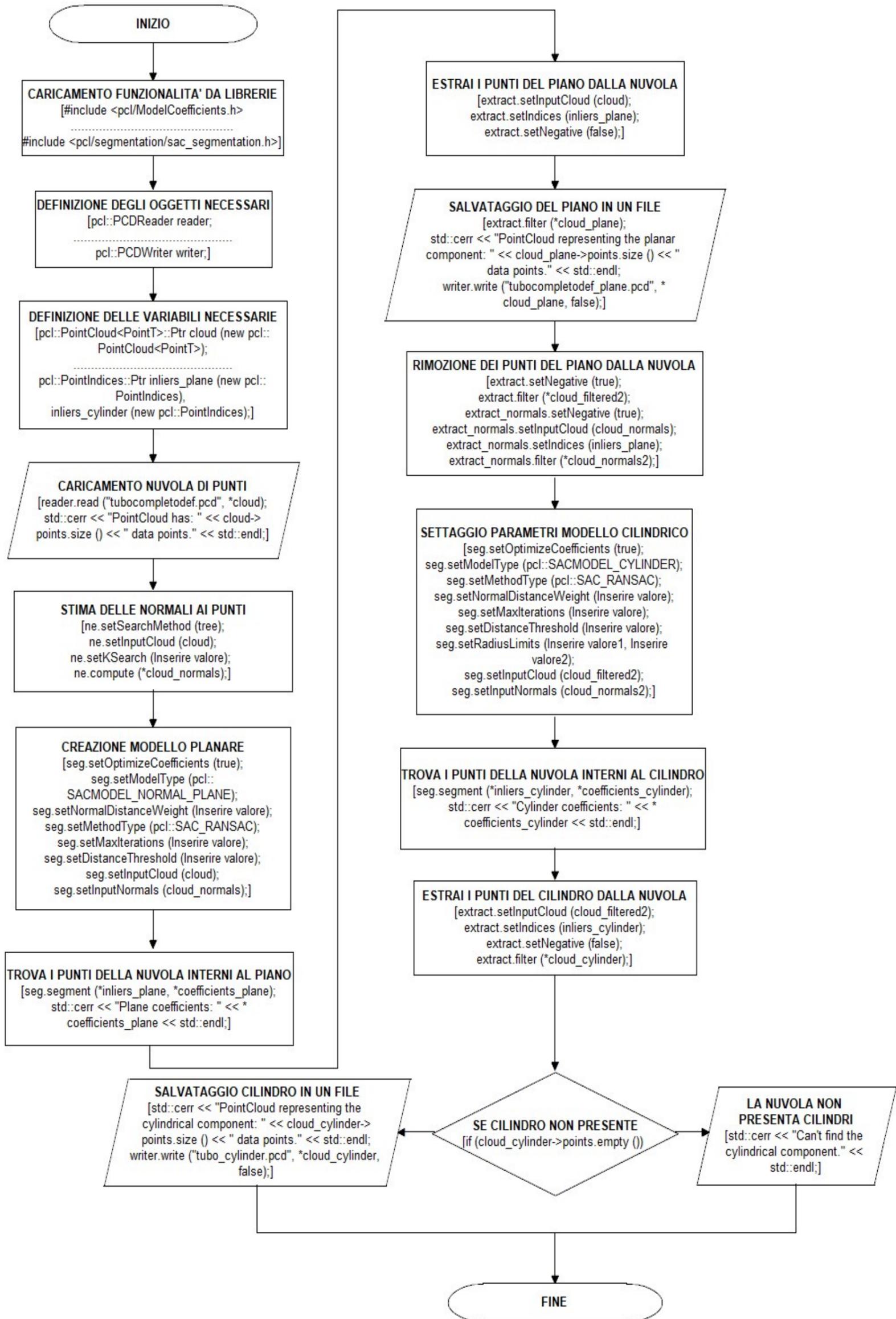


Fig. 5.3.4.6 - Diagramma di flusso codice PCL tubo portaoggetti

### 5.3.5 - Analisi risultati

N° sez.	Tubo Riferimento PVC Scansione:360°												
	N.punti: 1.635.695 punti					N.punti: 199.005 punti				N.punti: 13.510 punti			
	Reale	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm
Raggio [mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	
1	42,6	42,8	42,8	42,7	0,1	42,6	42,6	42,6	0,0	42,6	42,7	42,6	0,1
2	42	41,9	41,9	41,9	0,1	41,8	41,8	41,9	0,1	42,0	42	42,0	0,0
3	41,6	41,5	41,4	41,5	0,1	41,5	41,3	41,5	0,2	41,5	41,7	41,6	0,1
4	41,6	41,2	41,1	41,3	0,3	41,2	41,2	41,3	0,2	41,6	41,3	41,5	0,2
5	43	42,8	42,8	42,9	0,1	42,7	42,7	42,8	0,2	42,9	42,8	42,9	0,1
6	40	40,1	40	40,0	0,1	40,3	40,3	40,2	0,2	40,6	40,4	40,3	0,3
7	40	39,6	39,4	39,7	0,3	40	39,8	39,9	0,1	40,4	40,2	40,2	0,2
8	40	39,4	39,5	39,6	0,3	39,7	39,7	39,8	0,2	40,2	40	40,1	0,1
9	42	41,9	42,2	42,0	0,2	42	42	42,0	0,0	42,3	42,1	42,1	0,2

Tab 5.3.5.1 - Raggi del cilindro ideale nel modello a 360°

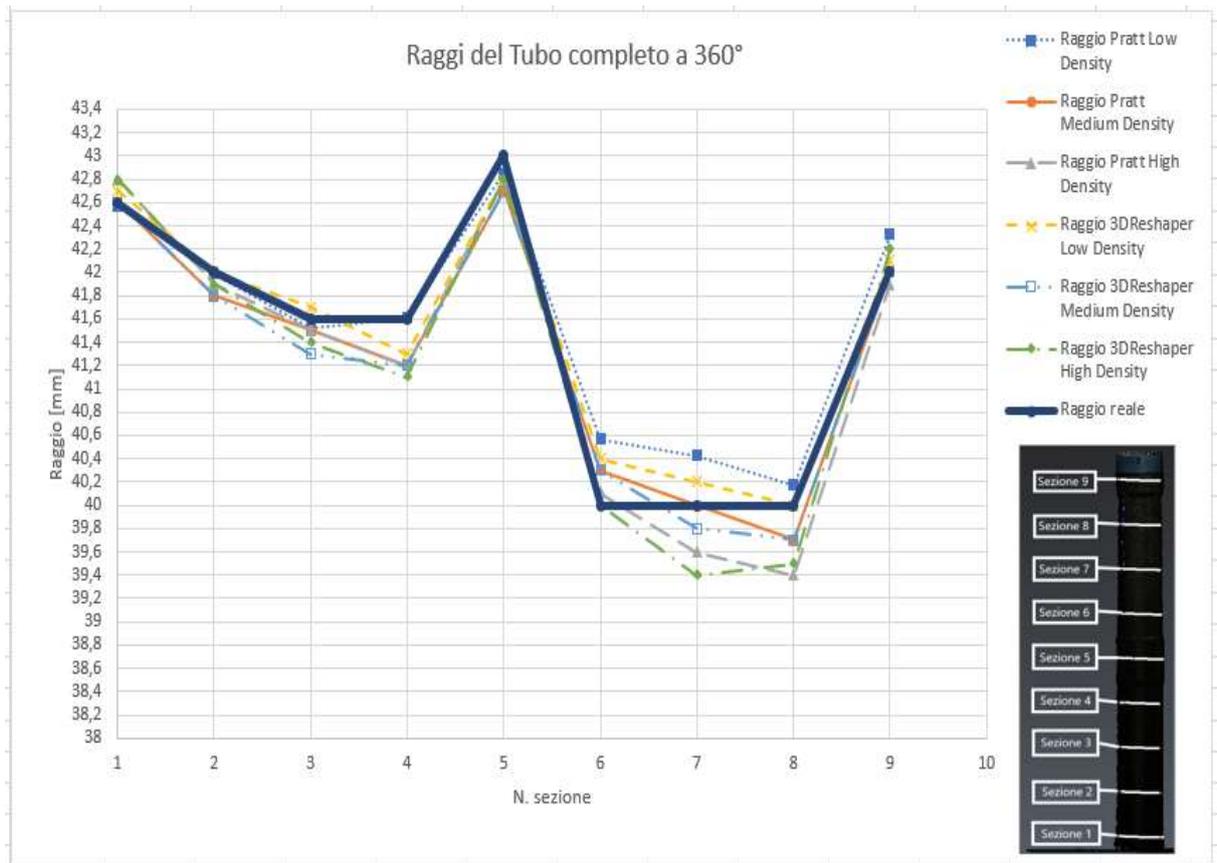


Fig.5.3.5.1 - Grafico dei raggi del cilindro ideale nel modello a 360°

Tubo Riferimento PVC Scansione:270°														
N°sez.	N.punti: 1.355.947 punti					N.punti: 174.774 punti					N.punti: 11.785 punti			
	Reale	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	
	Raggio [mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	
1	42,6	42,8	42,5	42,6	0,2	42,4	42,4	42,5	0,1	42,2	42,3	42,4	0,2	
2	42	41,7	41,5	41,7	0,3	41,3	41,3	41,5	0,4	41,3	41,2	41,5	0,4	
3	41,6	41,2	40,7	41,2	0,5	41	41	41,2	0,3	41,1	41,2	41,3	0,3	
4	41,6	40,9	40,8	41,1	0,4	40,8	40,8	41,1	0,5	41,1	40,9	41,2	0,4	
5	43	42,8	42,7	42,8	0,2	42,5	42,6	42,7	0,3	42,7	42,8	42,8	0,2	
6	40	39,9	40	40,0	0,1	40,3	39,9	40,1	0,2	40,2	40,2	40,1	0,1	
7	40	39,3	39,5	39,6	0,4	39,9	39,4	39,8	0,3	39,9	39,6	39,8	0,2	
8	40	39,1	39,5	39,5	0,5	39,5	39,3	39,6	0,4	39,7	39,7	39,8	0,2	
9	42	42	42,4	42,1	0,2	41,9	42	42,0	0,1	42,2	41,9	42,0	0,2	

Tab. 5.3.5.2 - Raggi del cilindro ideale nel modello a 270°

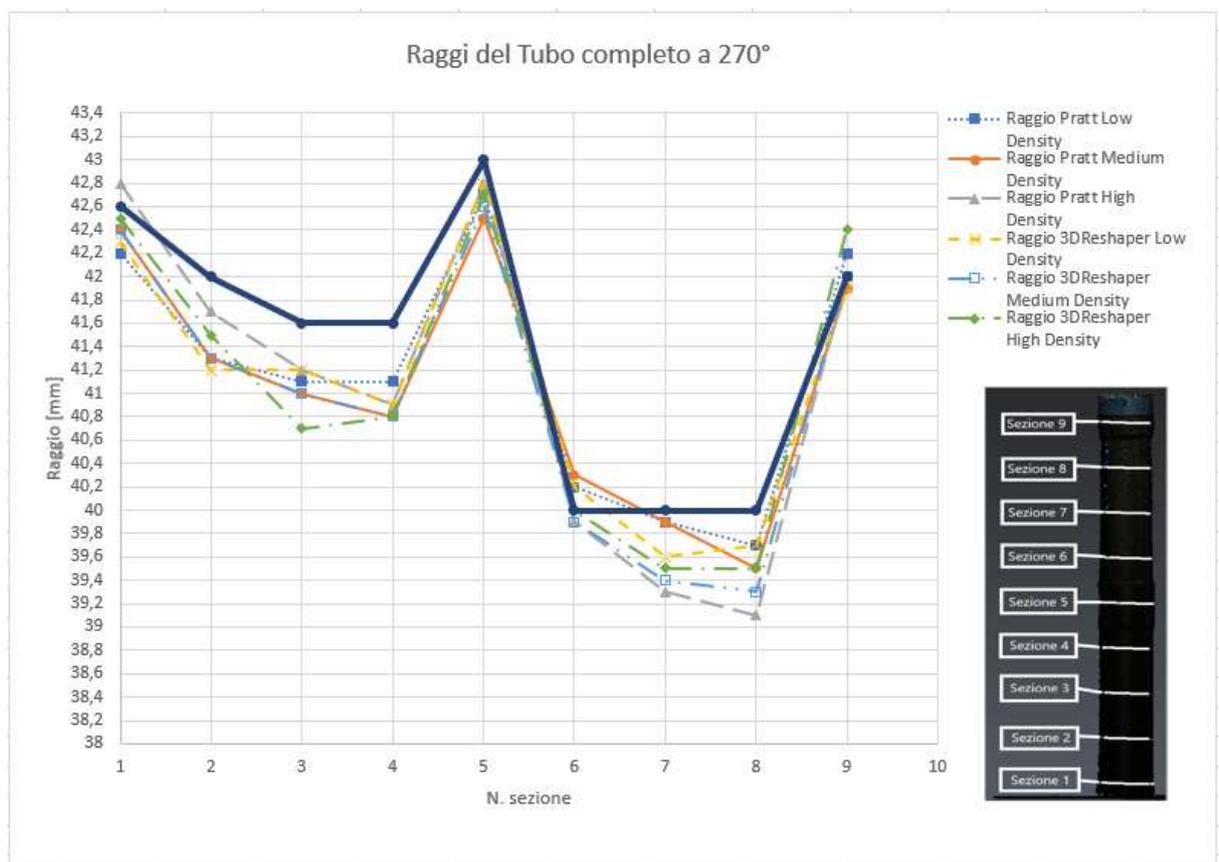


Fig. 5.3.5.2 - Grafico dei raggi del cilindro ideale nel modello a 270°

Tubo Riferimento PVC Scansione:180°													
N°sez.	N.punti: 963.332 punti					N.punti: 129.154 punti				N.punti: 9.028 punti			
	Reale	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm
	Raggio [mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]
1	42,6	44,1	43,1	43,3	0,8	43,7	43,9	43,4	0,7	43,7	43,5	43,3	0,6
2	42	43,2	42,6	42,6	0,6	42,5	42,7	42,4	0,4	43,1	43	42,7	0,6
3	41,6	42,7	42,6	42,3	0,6	42,2	42,6	42,1	0,5	41,9	42	41,8	0,2
4	41,6	42	41,3	41,6	0,4	41,5	41,6	41,6	0,1	41,4	41,6	41,5	0,1
5	43	43,4	42,8	43,1	0,3	43,5	43,3	43,3	0,3	43,5	43,6	43,4	0,3
6	40	40,8	40,8	40,5	0,5	41	40,8	40,6	0,5	41,3	41,6	41,0	0,9
7	40	40,6	41	40,5	0,5	40,7	40,9	40,5	0,5	40,7	40,6	40,4	0,4
8	40	39,7	40	39,9	0,2	39,2	39,3	39,5	0,4	39,3	39,3	39,5	0,4
9	42	42,3	42,5	42,3	0,3	41,7	41,7	41,8	0,2	41,4	41,9	41,8	0,3

Tab. 5.3.5.3 - Raggi del cilindro ideale nel modello a 180°



Fig. 5.3.5.3 - Grafico dei raggi del cilindro ideale nel modello a 180°

Tubo Riferimento PVC Scansione:90°													
N°sez.	N.punti: 704.634 punti					N.punti: 98.758 punti				N.punti: 7.063 punti			
	Reale	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm
	Raggio [mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]
1	42,6	44,1	42,6	43,1	0,9	44,3	44,6	43,8	1,1	46,4	46,6	45,2	2,3
2	42	40,7	41,6	41,4	0,7	39,2	39,7	40,3	1,5	39,6	39,3	40,3	1,5
3	41,6	40,6	40,6	40,9	0,6	38,6	38,8	39,7	1,7	37,6	37,6	38,9	2,3
4	41,6	40,7	40,8	41,0	0,5	38,7	39,1	39,8	1,6	36,9	36,7	38,4	2,8
5	43	43,6	42,6	43,1	0,5	42,7	43	42,9	0,2	42,4	43,2	42,9	0,4
6	40	36,4	36,8	37,7	2,0	35,8	36	37,3	2,4	36,3	36,3	37,5	2,1
7	40	33,3	34,5	35,9	3,6	34,3	34,6	36,3	3,2	36,5	36,3	37,6	2,1
8	40	35,6	35,9	37,2	2,5	35	35	36,7	2,9	34,9	36	37,0	2,7
9	42	44,3	43,7	43,3	1,2	42,1	42,1	42,1	0,1	39,2	39,7	40,3	1,5

Tab. 5.3.5.4 - Raggi del cilindro ideale nel modello a 90°

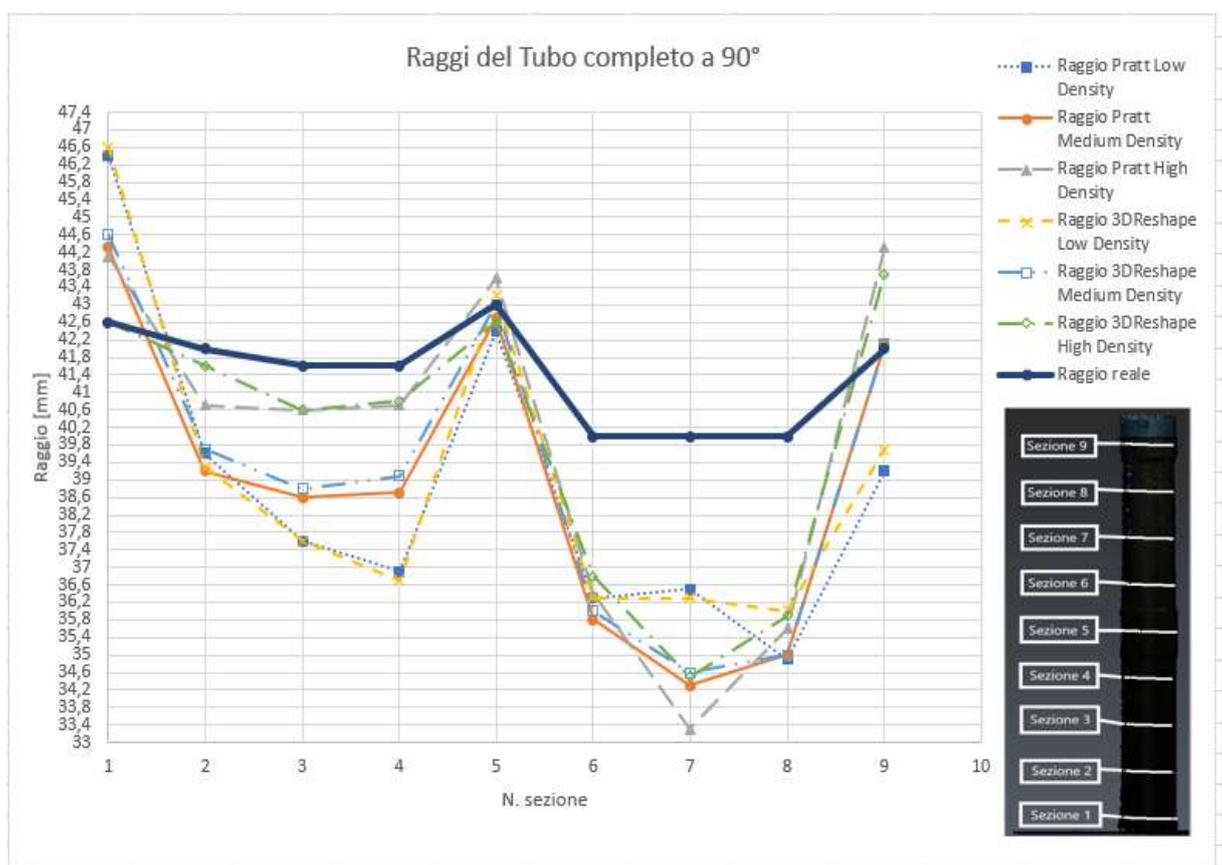


Fig. 5.3.5.4 - Grafico dei raggi del cilindro ideale nel modello a 90°

Tubo Riferimento PVC Scansione:45°													
N°sez.	Densità: 546.836 punti					Densità: 85.014 punti				Densità: 6.084 punti			
	Reale	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm	Pratt	3DReshaper	Media	Sqm
	Raggio [mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]	Raggio [mm]	Raggio [mm]	[mm]	[mm]
1	42,6	45,3	45,3	44,4	1,6	47,2	46,7	45,5	2,5	49,5	49,8	47,3	4,1
2	42	37,1	37,7	38,9	2,7	34,9	34,5	37,1	4,2	39,7	39,5	40,4	1,4
3	41,6	38,3	38,2	39,4	1,9	34,1	34,1	36,6	4,3	28,8	28,6	33,0	7,4
4	41,6	36,3	36,9	38,3	2,9	32	32,3	35,3	5,5	25,2	25,4	30,7	9,4
5	43	42,6	42,7	42,8	0,2	44,1	43,8	43,6	0,6	41,5	159,8	81,4	67,9
6	40	30,4	31,7	34,0	5,2	28,9	29,2	32,7	6,3	28	28,6	32,2	6,8
7	40	28,1	28,1	32,1	6,9	27	27,2	31,4	7,4	23,9	13,4	25,8	13,4
8	40	31,2	33,4	34,9	4,6	29,1	29,4	32,8	6,2	19	7	22,0	16,7
9	42	46,4	45,5	44,6	2,3	26,7	32,8	33,8	7,7	33,6	34,5	36,7	4,6

Tab. 5.3.5.5 - Raggi del cilindro ideale nel modello a 45°

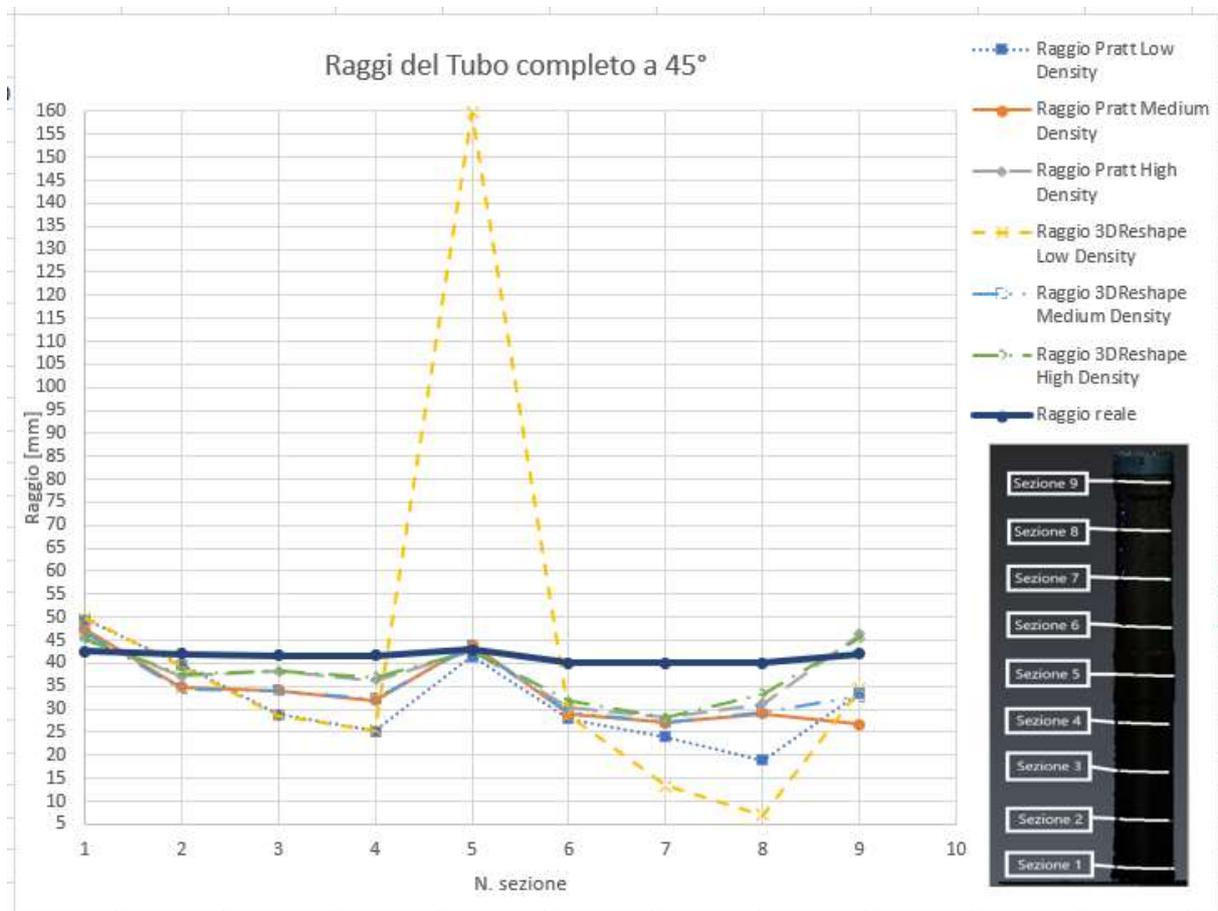


Fig. 5.3.5.5 - Grafico dei raggi del cilindro ideale nel modello a 45°

Nelle situazioni reali di rilievo per creare modelli “as built” frequentemente non è possibile, per come sono realizzati gli impianti, effettuare scansioni complete con angoli di ripresa a 360°. In questa prova si vuole verificare se, con scansioni limitate a riprese con angolazioni inferiori a 360°, si possono

ottenere dati geometrici accettabili per ricostruire il modello dell'oggetto "as built". In particolare, si desiderano ottenere i valori del raggio simulando scansioni inferiori a 360° elaborando solo una parte della nuvola ottenuta da una scansione completa a 360°. I dati geometrici che si vogliono ricavare sono i raggi di alcune sezioni trasversali spostandosi lungo il tubo. Il campione in esame è un tubo porta-progetti con raggio = 40 mm, con dimensioni trasversali simili alle tubazioni d'impianto scansionate nei corridoi. Il valore del raggio preso come riferimento è quello della scansione a 360° con un numero di punti pari a 1.635.695, che risulta essere uguale a 40,5 mm. Dai grafici si nota che ci sono tre picchi del valore del raggio in corrispondenza delle sezioni di base e mezzeria, che risulta essere pari a circa 42,5 mm. Questo in quanto il cilindro in esame non presenta un diametro costante, ma ha tre sezioni trasversali in cui il diametro è più grande. La valutazione del raggio si discosta molto dal valore medio di 40 mm passando dal modello 3D a 90° al modello a 45° dove con l'algoritmo di PCL passa da 35 mm a 21 mm. Facendo un confronto tra 3DReshaper e MATLAB invece, si verifica che i valori ottenuti con MATLAB presentano maggiore accuratezza rispetto al valore di riferimento ed è facilmente verificabile dal picco e dall'andamento del grafico presente nella fig. 5.3.5.5.

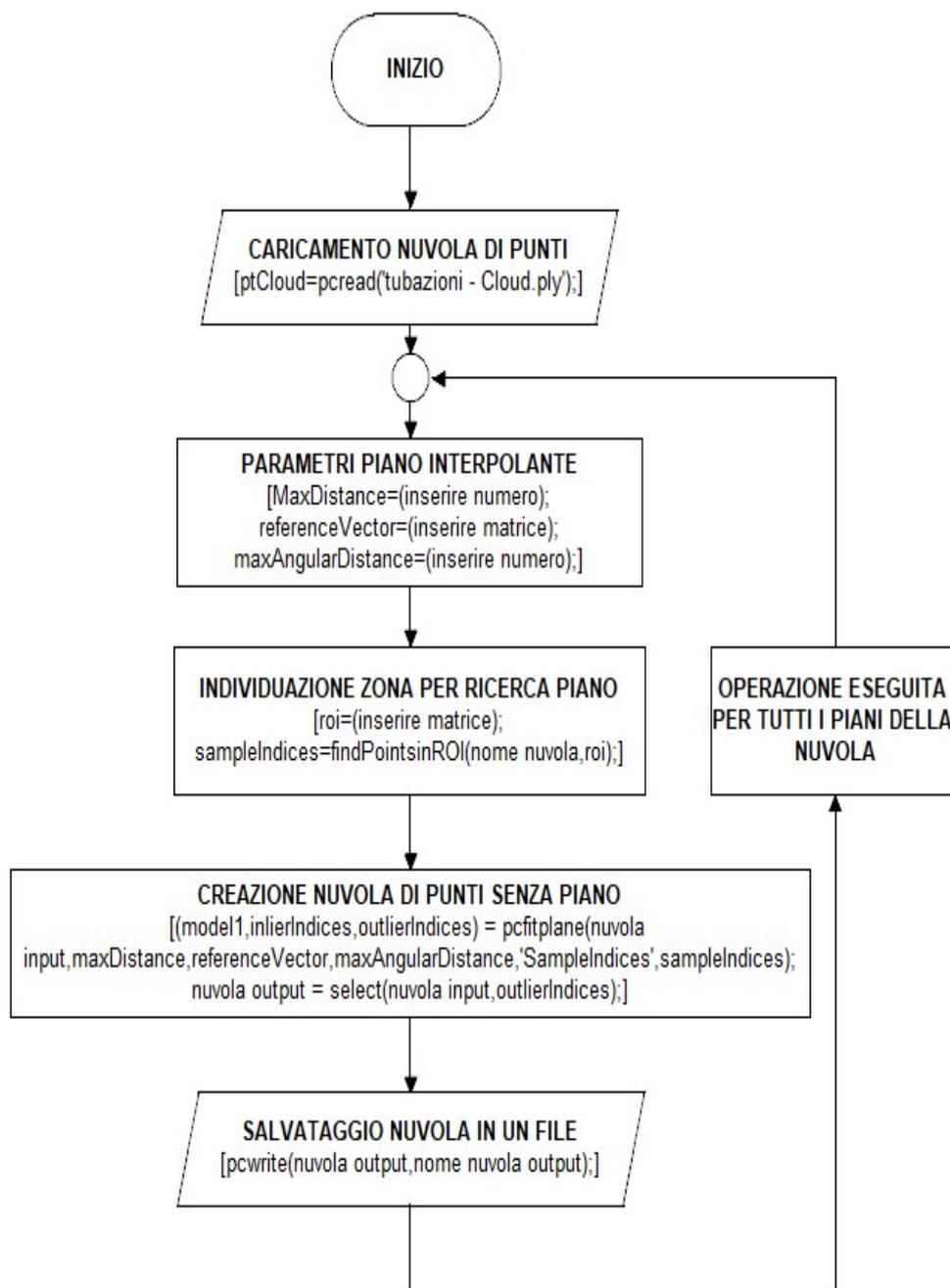
## **5.4 - Prova n. 5: Elaborazione dati e analisi risultati**

L'elaborazione delle nuvole ottenute con le procedure e gli strumenti descritti nel paragrafo 4.5 vengono elaborate con i seguenti software:

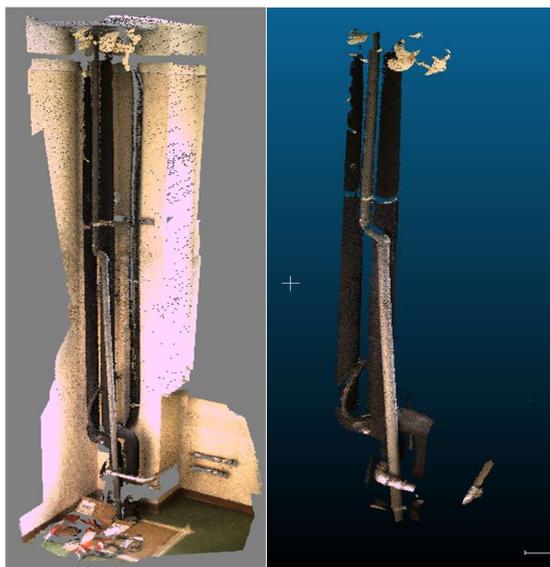
- Matlab
- 3DReshaper

### **5.4.1 - Elaborazione nuvola con Matlab**

Il passaggio successivo è stato quello di utilizzare MATLAB per poter ottenere le informazioni necessarie. E' stato utilizzato un apposito tool di Matlab: Computer Vision Toolbox. Una volta aperto il software MATLAB, sono state importate le nuvole in formato PLY, formato riconosciuto sia dal tool che da ECHO. Utilizzando le apposite funzioni, dalla nuvola originale sono state rimosse le pareti verticali, il soffitto e il pavimento. Tra i dati di input utilizzati si evidenzia che si è dovuto specificare la direzione principale di estensione della tubazione (in questo caso lungo la direzione z), la zona in cui ricade la parete da sottrarre utilizzando il sistema di riferimento cartesiano generato da Matlab e infine la massima distanza del piano interpolante la parete dal generico punto della nuvola. Si riporta in allegato lo script completo, che è stato scritto seguendo le istruzioni presenti all'interno della documentazione del Computer Vision Toolbox di Matlab (All.to n.6). Viene riportato di seguito il diagramma di flusso dello script contenuto nell'allegato (fig.5.4.1.1) e il risultato di quest'operazione (fig. 5.4.1.2).



**Fig.5.4.1.1** - Diagramma di flusso script Matlab per l'estrazione dei piani



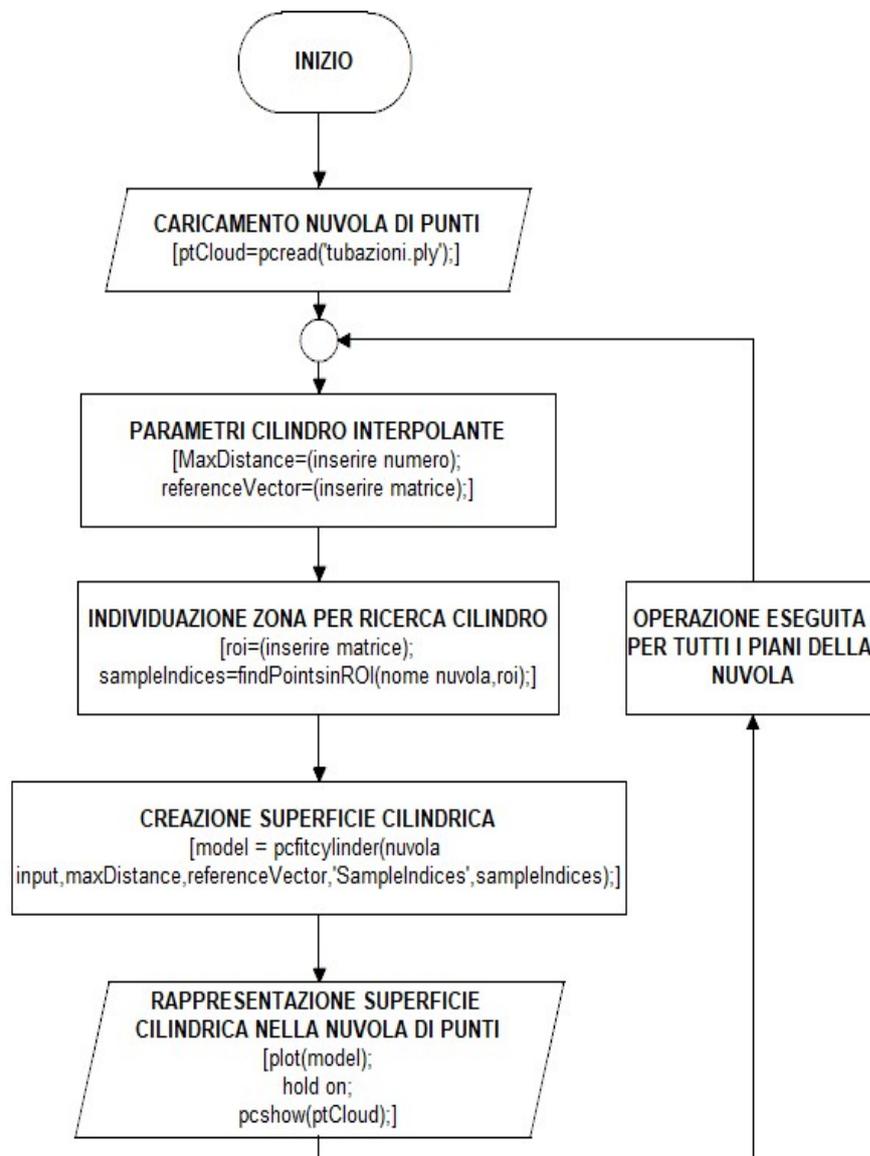
**Fig. 5.4.1.2** - Nuvola di input (sinistra) e output (destra)

Inizialmente si è ricavata la geometria delle tubazioni attraverso un algoritmo che consente l'estrazione di superfici cilindriche. La funzione restituisce un modello geometrico che descrive il cilindro. Questa funzione utilizza l'algoritmo M-estimator SAMple Consensus (MSAC) per trovare il cilindro. L'algoritmo MSAC è una variante dell'algoritmo RANdom SAMple Consensus (RANSAC).

All'interno dell'algoritmo MSAC esiste la funzione di adattamento `pcfitcylinder` che richiede le normali alla superficie della nuvola di punti. Pertanto, se la proprietà `normal` della nuvola di punti di input è vuota, la funzione la crea in automatico. Quando la funzione riempie la proprietà `normal` utilizza sei punti per adattarsi al cilindro locale. Dopo aver provato a eseguire lo script riportato in allegato (All. to n.7), di cui si riporta il diagramma di flusso in fig. 5.4.1.4, il risultato non è stato soddisfacente: l'algoritmo non è stato in grado di trovare la singola superficie cilindrica (evidenziata in blu in fig. 5.4.1.3).



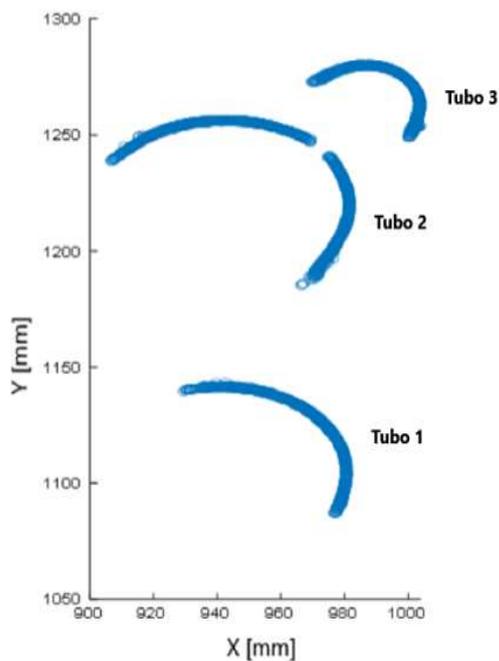
**Fig. 5.4.1.3** - Nuvola di input (sinistra) e output (destra)



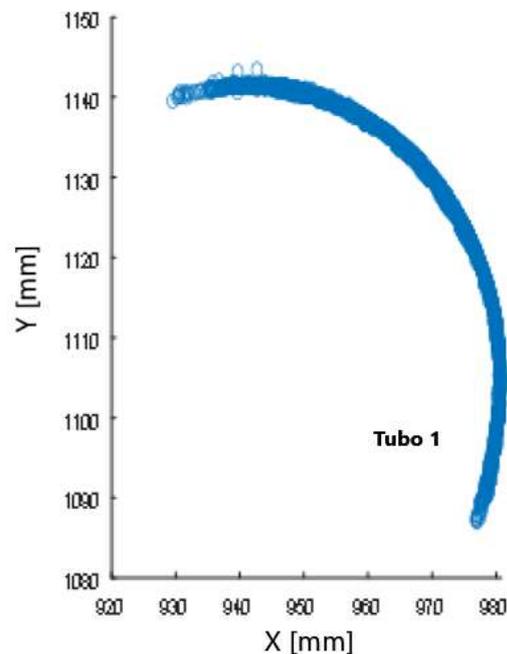
**Fig. 5.4.1.4** - Diagramma di flusso algoritmo RANSAC per superficie cilindrica

Questo è dovuto probabilmente al fatto, come si vedrà in seguito, che la nuvola di punti della tubazione in certe zone è rappresentata solo per un quarto della sua estensione superficiale in quanto durante il rilievo non è stato possibile scansionare a 360°. Inoltre, testando l'algoritmo su una nuvola di punti realizzata ad hoc su Matlab rappresentata da un cilindro con direttrice l'asse z, si è notato che, nel momento in cui si va ad aggiungere del rumore alla superficie della nuvola di punti, l'algoritmo estrae una superficie errata in termini di posizione e raggio. Per questo motivo si è utilizzato un altro metodo per determinare il raggio della tubazione. Si sono sezionate le tubazioni con piani aventi la normale

lungo l'asse z, con piani aventi uno "spessore" di 1 cm per avere una buona densità di punti. Viene riportato lo script utilizzato negli allegati (All.to n.8). Le sezioni sono rappresentate da matrici di dimensioni  $N \times 2$  dove N è il numero di punti della nuvola. Nella figura 5.4.1.7 sono indicate schematicamente le operazioni fatte per ogni sezione a quota z. Per le diverse sezioni lo schema a blocchi si ripete e vengono modificati solamente i parametri per estrarre la nuvola di punti relativa a un singolo tubo in quanto ne sono presenti 3. A titolo di esempio si riporta di seguito l'immagine della prima sezione (fig. 5.4.1.5) e quella del primo tubo in basso (fig. 5.4.1.6).



**Fig. 5.4.1.5** - Sezione delle tubazioni a quota 2,3 m rispetto al SdR locale



**Fig. 5.4.1.6**- Ingrandimento sezione del tubo 1

Una volta che sono state calcolate le posizioni spaziali e planari di ogni singolo tubo, si è proceduto ad utilizzare un algoritmo, chiamato algoritmo di Pratt, per ricavare dati delle coordinate del centro della circonferenza e il raggio del cerchio. Questo algoritmo funziona correttamente anche in presenza di poche informazioni, quindi in presenza solo di archi poco estesi. Si riporta negli allegati (All. to n.1) lo script dell'algoritmo, richiamato nello script principale utilizzando la funzione CircleFitByPratt(XY). Le tabelle delle misure di confronto sono riportate nel paragrafo 5.4.3.



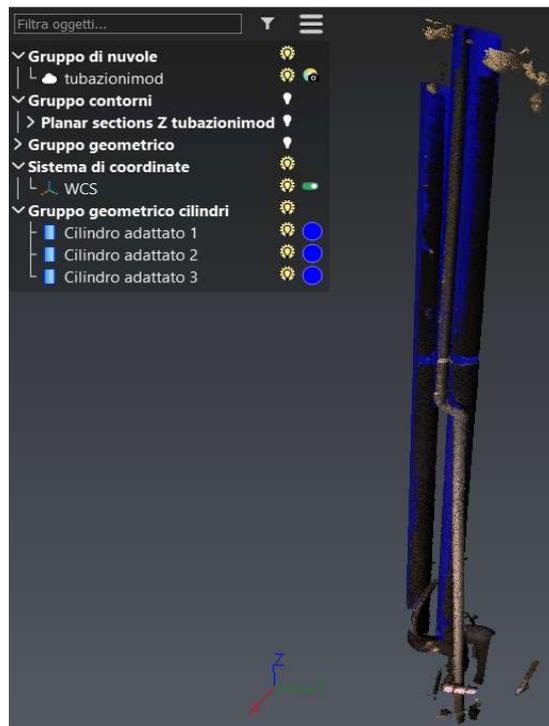
## 5.4.2 - Elaborazione nuvola con 3DReshaper

Al fine di confrontare i risultati utilizzando un altro software, questo sottocapitolo prende in esame le misure ottenibili mediante il software 3DReshaper della Hexagon, per il trattamento delle nuvole di punti. Dopo aver importato la nuvola di punti in formato e57, si è voluto cercare di estrarre il cilindro che si adatti meglio alle tubazioni. Per fare ciò si è utilizzata una funzione presente nella sezione “Costruisci” del programma, chiamata “Estrai cilindro”. In ingresso si devono fornire:

- Raggio, Diametro, Centro.
- Direzione dell'asse.

Si deve poi selezionare almeno un punto iniziale presente sulla nuvola di punti della tubazione.

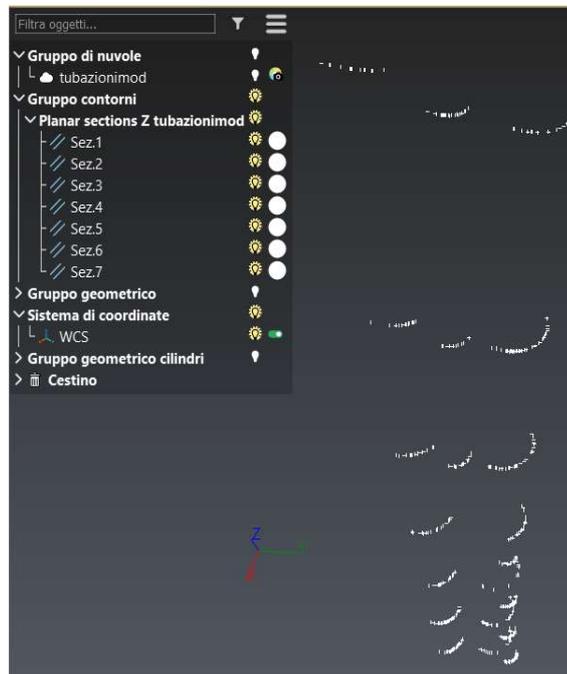
In questo caso si è deciso di impostare l'asse del cilindro fisso dandogli come direzione quella parallela all'asse z. L'operazione è stata eseguita tre volte in quanto presenti tre tubazioni. Il risultato è il seguente:



**Fig.5.4.2.1** - Estrazione dei cilindri equivalenti con il software 3DReshape

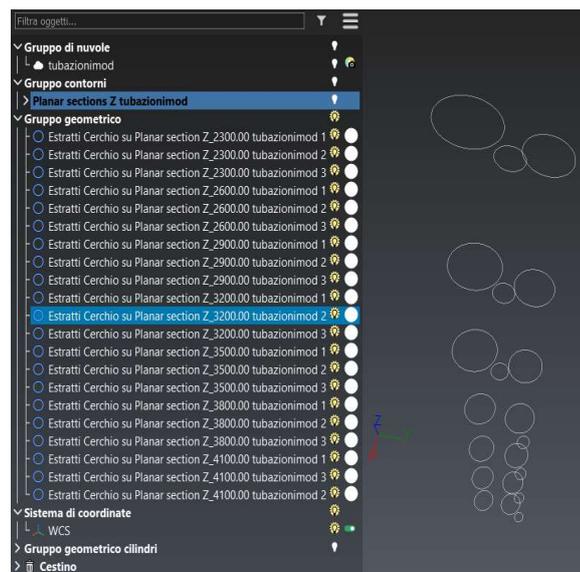
Al fine di avere un termine di paragone diretto con i risultati precedenti ottenuti con Matlab, si è proceduto a realizzare delle sezioni della nuvola di punti alla stessa quota utilizzata da Matlab. Per raggiungere lo scopo, si seleziona la nuvola, si entra nel sottomenu “Poligonale” e si utilizza la funzione “Sezioni planari”. Nel sottomenu che si presenta si va ad indicare il numero delle sezioni in numero intero, il passo delle sezioni, lo spessore del piano, la distanza di concatenazione, la direzione principale dei piani. In questo caso si inserisce la coordinata z del primo piano di sezionamento facendo riferimento

alle coordinate utilizzate in Matlab. Una volta inseriti tutti i dati necessari (in questo caso si è lasciata la distanza di concatenazione come valore di default), il software genera una poligonale che unisce i punti presenti all'interno dello spessore del piano (fig. 5.4.2.2).



**Fig. 5.4.2.2** - Estrazione delle sezioni come poligonali con il software 3DReshape

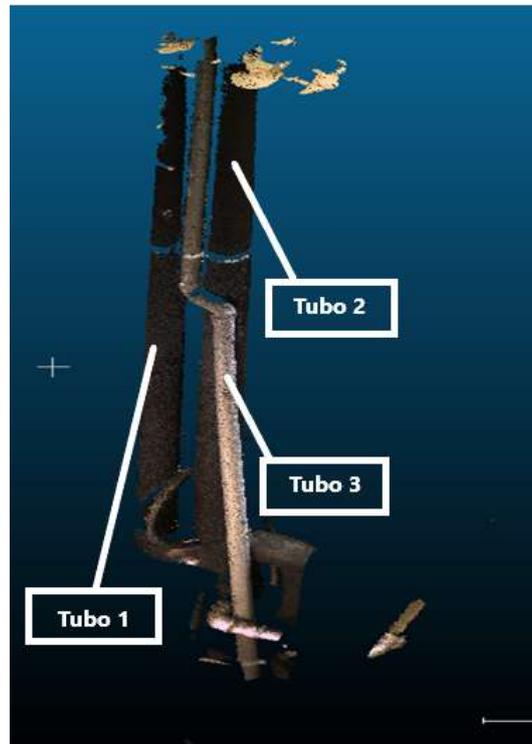
Per trovare il cerchio equivalente a ogni poligonale, si è tornati nel sottomenu “costruisci” e si è selezionato la funzione “cerchio adattato”. Nel menu a comparsa, non si è impostato nessun parametro, a parte il metodo di calcolo per l’interpolazione dei punti, che è stato scelto in base al miglior adattamento alla poligonale (fig. 5.4.2.3).



**Fig. 5.4.2.3:** Estrazione delle circonferenze interpolanti le poligonali di ogni sezione a diverse quote

### 5.4.3 - Analisi risultati

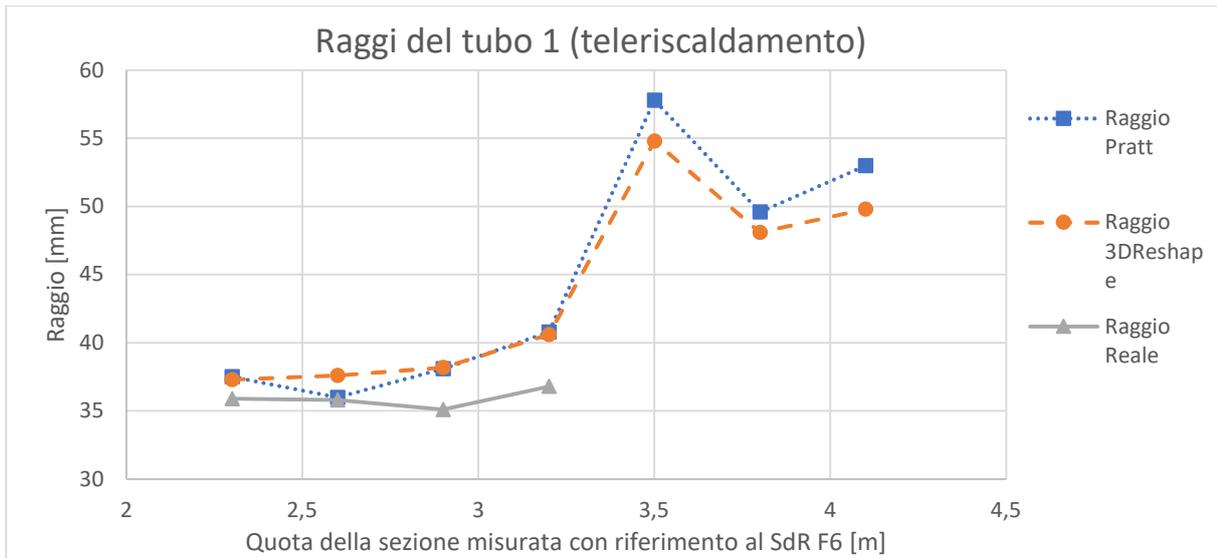
I risultati finali sono stati trascritti in una tabella, dove per alcune sezioni, sono state riportate anche le misure reali dei diametri delle tubazioni, ottenute tramite misurazione con un calibro.



**Fig.5.4.3.1** - Numerazione delle tubazioni

Hsez [m]	Tubazione 1 (teleriscaldamento)									
	Schiuma Poliuretanic							Raggio Reale [mm]	Media	Sqm
	Pratt	3DReshaper	Pratt	Pratt	3DReshaper	3DReshaper	Raggio [mm]			
Raggio [mm]	Raggio [mm]	Xcentro [cm]	Ycentro [cm]	Xcentro [cm]	Ycentro [cm]					
2,3	37,5	37,3	94,30	110,38	94,33	110,40	35,9	36,9	0,9	
2,6	36	37,6	94,60	110,16	94,60	110,07	35,8	36,5	1,0	
2,9	38,1	38,2	94,90	109,80	94,90	109,80	35,1	37,1	1,8	
3,2	40,8	40,6	95,06	109,44	95,07	109,45	36,8	39,4	2,3	
3,5	57,8	54,8	94,20	107,90	94,86	108,38	/	56,3	2,1	
3,8	49,6	48,1	95,20	108,69	95,21	108,89	/	48,9	1,1	
4,1	53	49,8	95,20	108	95,67	108,44	/	51,4	2,3	

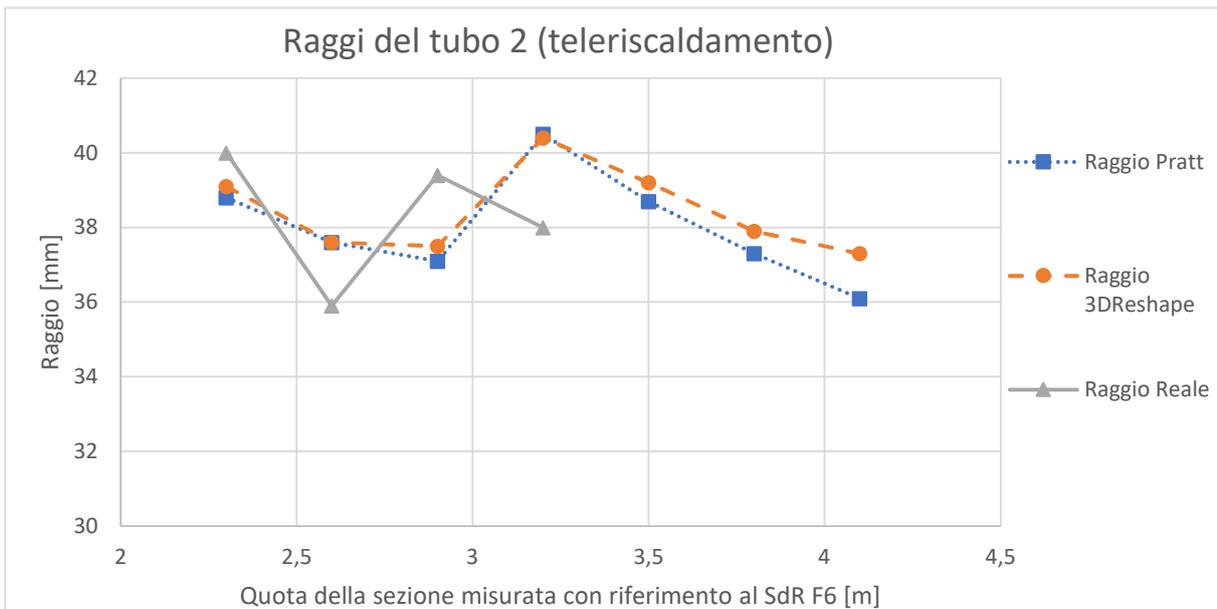
**Tab.5.4.3.1** - Tabella risultati dati misurati tubazione 1



**Fig.5.4.3.2 - Grafico raggi tubazione 1**

Hsez [m]	Tubazione 2 (Teleriscaldamento)									
	Schiuma Poliuretantica							Raggio Reale [mm]	Media Raggio [mm]	Sqm Raggio [mm]
	Pratt Raggio [mm]	3DReshaper Raggio [mm]	Pratt Xcentro [cm]	Pratt Ycentro [cm]	3DReshaper Xcentro [cm]	3DReshaper Ycentro [cm]				
2,3	38,8	39,1	94,20	121,80	94,20	121,78	40	39,3	0,6	
2,6	37,6	37,6	94,60	121,40	94,60	121,41	35,9	37,0	1,0	
2,9	37,1	37,5	95,20	121,30	95,10	121,24	39,4	38,0	1,2	
3,2	40,5	40,4	95,56	120,72	95,54	120,73	38	39,6	1,4	
3,5	38,7	39,2	96	120,32	95,93	120,39	/	39,0	0,4	
3,8	37,3	37,9	96,50	120,08	96,39	120,16	/	37,6	0,4	
4,1	36,1	37,3	97	119,87	96,83	119,83	/	36,7	0,8	

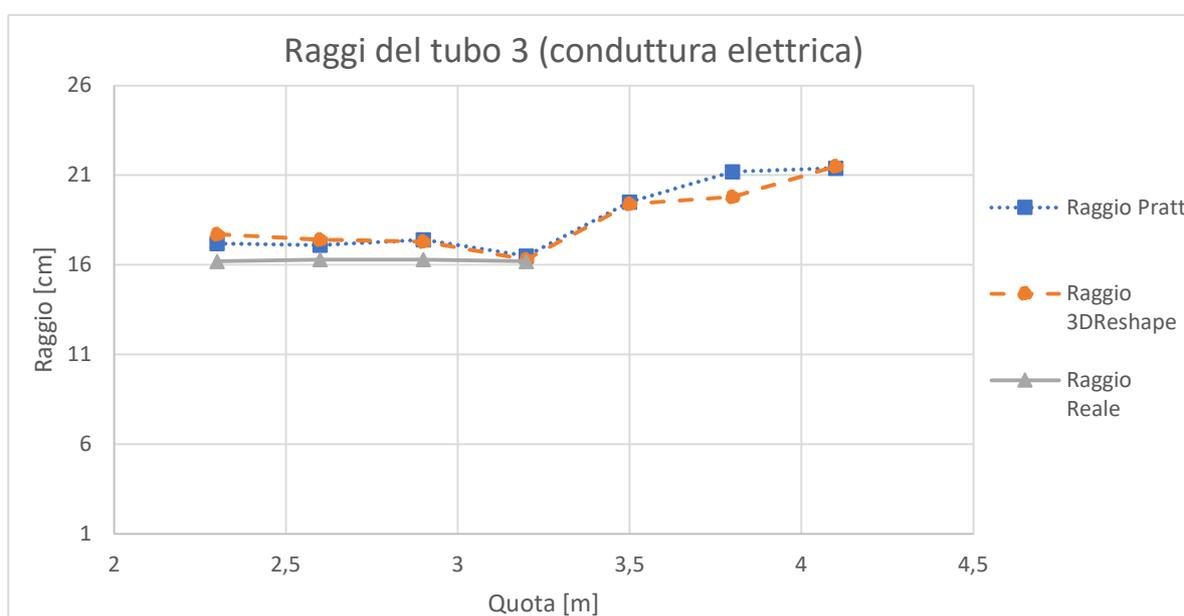
**Tab. 5.4.3.2 - Tabella risultati dati misurati tubazione 2**



**Fig. 5.4.3.3 - Grafico raggi tubazione 2**

Tubazione 3 (conduttura elettrica diam. nom. 32 mm)									
PVC									
Hsez [m]	Pratt	3DReshaper	Pratt	Pratt	3DReshaper	3DReshaper	Raggio Reale [mm]	Media	Sqm
	Raggio [mm]	Raggio [mm]	Xcentro [cm]	Ycentro [cm]	Xcentro [cm]	Ycentro [cm]		Raggio [mm]	Raggio [mm]
2,3	17,2	17,7	98,6	126,29	98,6	126,26	16,2	17,0	0,8
2,6	17,1	17,4	99,47	124,84	99,43	124,79	16,3	16,9	0,6
2,9	17,4	17,3	100,46	123,8	100,44	123,83	16,3	17,0	0,6
3,2	16,5	16,3	101,55	123	101,65	123,02	16,2	16,3	0,2
3,5	19,5	19,4	98,62	114,9	98,46	114,92	/	19,5	0,1
3,8	21,2	19,8	99,16	114,93	99,03	114,97	/	20,5	1,0
4,1	21,4	21,5	99,73	115,82	99,57	114,96	/	21,5	0,1

**Tab. 5.4.3.3** - Tabella risultati dati misurati tubazione 3



**Fig. 5.4.3.4** - Grafico raggi tubazione 3

Dai risultati si può notare che l'errore in generale è contenuto entro 5 mm per quanto riguarda le due tubazioni idrauliche e del teleriscaldamento che hanno un diametro complessivo che si aggira intorno a 70-80 mm, mentre l'errore diminuisce molto per il tubo della conduttura elettrica di diametro misurato con calibro pari a 16,2 mm. Si può dire in linea generale che l'errore tenda a crescere con l'aumentare delle dimensioni della tubazione. Si tende a escludere che la differenza di errore sia dovuta al diverso materiale con cui è rivestita la tubazione, in quanto si è notato che la nuvola grezza, ancora prima di essere filtrata, presentava poco rumore in funzione della diversa natura del materiale.

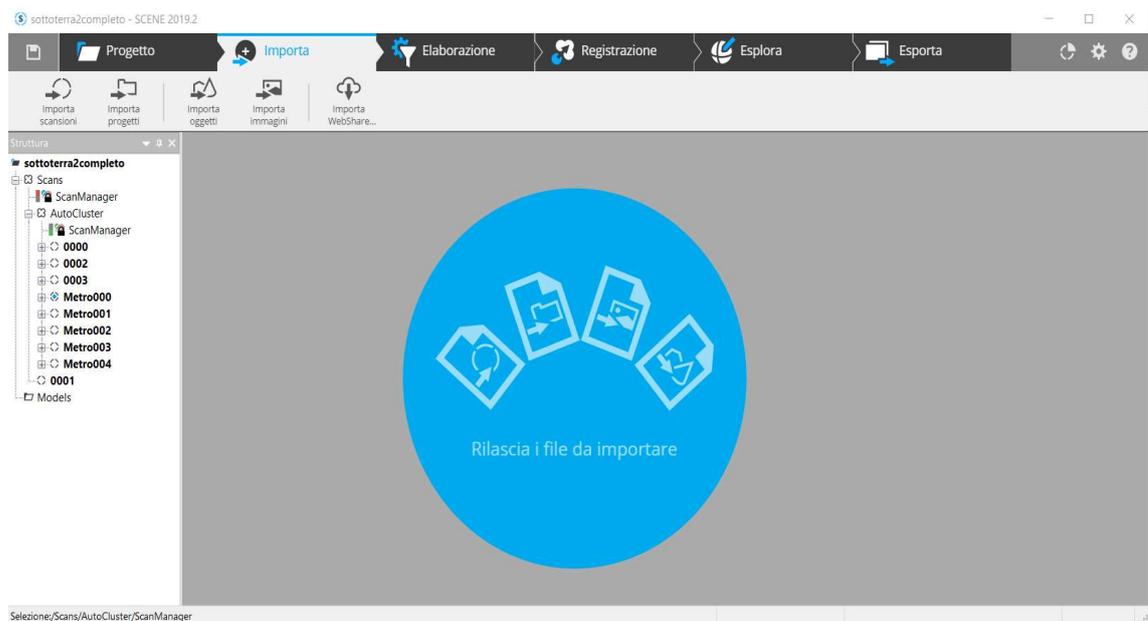
## 5.5 - Prova n. 6: Elaborazione dati e analisi risultati

L'elaborazione delle nuvole ottenute con le procedure e gli strumenti descritti nel paragrafo 4.7 vengono elaborate con i seguenti software:

- FARO Scene
- CloudCompare
- 3DReshaper
- Matlab
- Librerie PCL

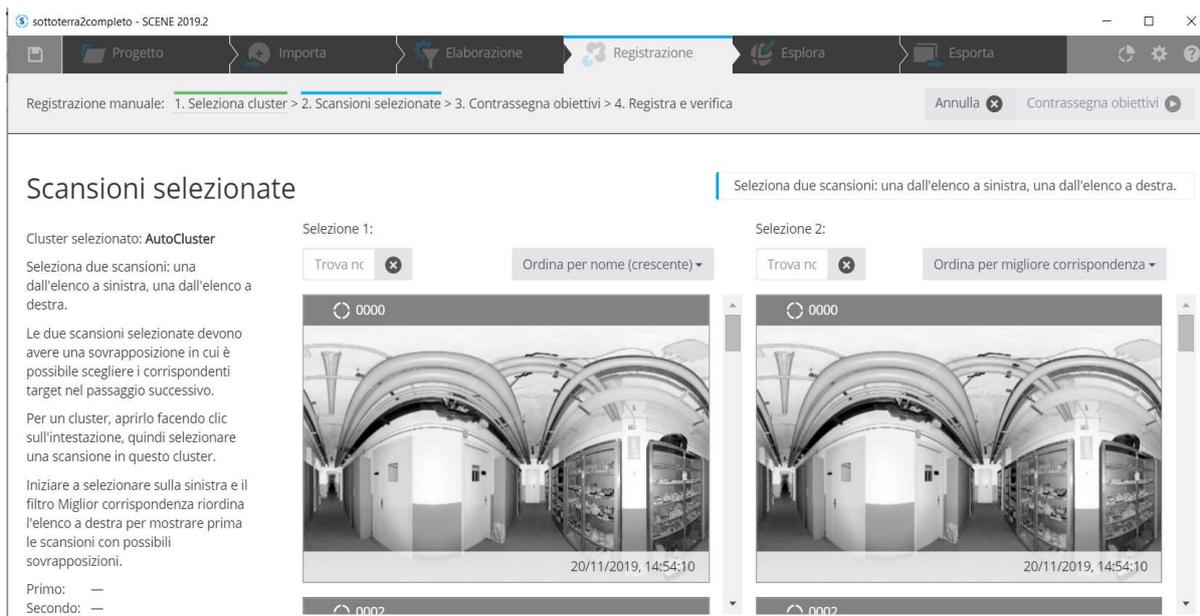
### 5.5.1 - Elaborazione delle nuvole Lidar con FARO Scene

Una volta effettuate tutte le scansioni, per velocizzare le operazioni e per ottenere un risultato complessivo dell'operazione di registrazione, si è deciso di utilizzare il software FARO Scene per allineare le scansioni. Una volta aperto il software si sono importate le cartelle contenenti le singole scansioni all'interno del sottomenu di importazione del software semplicemente trascinandole all'interno della finestra (fig. 5.5.1.1).



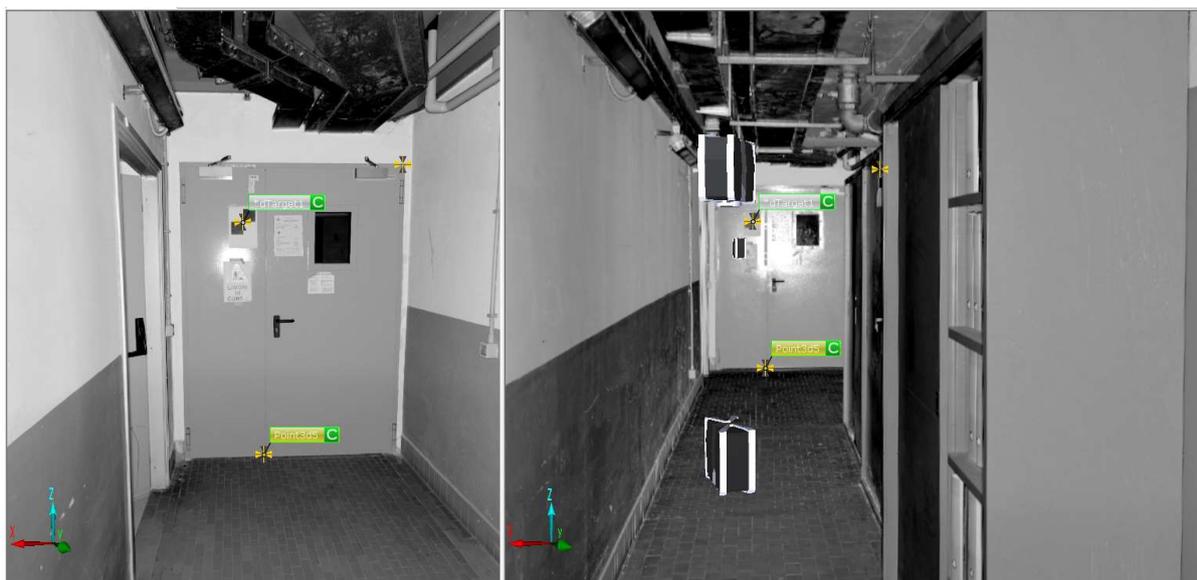
**Fig. 5.5.1.1** – Finestra per l'importazione delle scansioni sul software FARO Scene

Importate tutte le scansioni, si bypassa la parte di elaborazione delle nuvole e si passa direttamente alla sezione di registrazione. Si seleziona la registrazione manuale per indicare i punti in comune alle scansioni, selezionandole a coppie contigue.



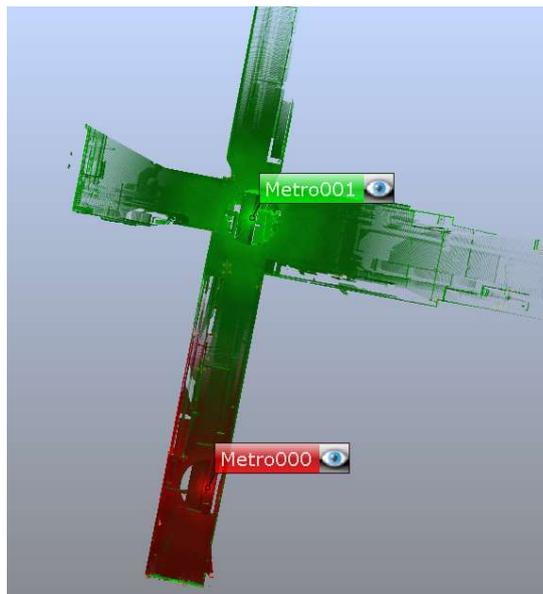
**Fig.5.5.1.2** – Selezione delle scansioni per l’allineamento sul software FARO Scene

Premendo in alto a destra (fig. 5.5.1.2) sul tasto “contrassegna obiettivi” si aprono le immagini acquisite dallo strumento. Qui si sono utilizzate due tipologie di contrassegni tra quelle disponibili: “contrassegna punto” e “contrassegna scacchiera” (target). I punti sono stati utilizzati per contrassegnare quelli naturali presenti (es. spigolo dell’armadio) in quanto nelle scansioni non si vedeva un numero sufficiente di target (raccomandati almeno 3-4 punti). Quando il software riconosce che il punto o il target vengono rilevati in entrambe le scansioni, a questi si attribuisce un codice univoco (fig.5.5.1.3).



**Fig. 5.5.1.3** - Individuazione di punti e target in due differenti scansioni sul software

Una volta conclusa l’operazione di assegnazione dei punti nelle due scansioni si seleziona “registra e verifica” e viene presentata un’anteprima della registrazione per valutarne la correttezza (fig. 5.5.1.4).



**Fig.5.5.1.4** – Anteprima del risultato dell'allineamento sul software FARO Scene

Verificata la correttezza dell'allineamento il software chiede conferma del risultato e si procede con la registrazione delle successive scansioni. Le due scansioni allineate vengono messe in un cluster.

Nei passi successivi si seleziona una scansione non allineata contigua a una delle due già allineate presenti nel cluster e così fino alla fine.

La registrazione automatica successiva permette di elaborare tutte le scansioni precedentemente allineate manualmente. Si ottiene in output un report che viene riportato nell'allegato n. 3, dove troviamo un errore medio pari a 4 mm e un errore massimo che si mantiene inferiore al centimetro. Si può concludere che per l'oggetto scansionato l'errore è contenuto in valori accettabili. Si nota inoltre che due scansioni hanno una piccola sovrapposizione rispetto alle altre: in particolare una scansione è stata fatta in una parte del corridoio con lunghezza pari a 30 m compresa tra due portali trasversali che hanno impedito la sovrapposizione della scansione in questa zona e con le altre esterne ai portali. Al fine di avere una ulteriore informazione in questo caso è stato anche utilizzato l'inclinometro 3D contenuto all'interno dello scanner, che equivale ad avere un punto in più di riferimento per la registrazione delle scansioni.

## 5.5.2 - Elaborazione delle nuvole F6 e Lidar con CloudCompare

Si usa il software CloudCompare per segmentare ed allineare le scansioni Lidar registrate precedentemente e per unire il risultato della segmentazione con la nuvola ottenuta con lo strumento a luce strutturata. La segmentazione ha lo scopo di limitare la zona di interesse in quanto solo sul soffitto sono presenti le tubazioni da rilevare di cui si desiderano stimare i parametri geometrici. La sequenza operativa è la seguente.

- Segmentazione della nuvola ottenuta con il Lidar.
- Importazione della nuvola ottenuta con F6 a luce strutturata.
- Allineamento per punti delle nuvole Lidar e F6.
- Allineamento ICP delle nuvole Lidar e F6.
- Calcolo delle distanze tra le nuvole e confronto.

Si deve annotare che la scansione con lo strumento F6 è stata fatta percorrendo il corridoio in un unico verso, in quanto lo strumento non è in grado di allineare perfettamente le nuvole acquisite di in un percorso di andata e ritorno. In questo caso si creano degli sfasamenti che difficilmente possono essere rimossi utilizzando la funzione di rimozione di singoli frame mediante ECHO.

L'allineamento con il comando "align" di CloudCompare è stato effettuato scegliendo n. 5 punti distribuiti lungo il corridoio facilmente riconoscibili in entrambe le nuvole (fig.5.5.2.1-5.5.2.2).

In seguito si è fatto un allineamento ICP per ottimizzare la sovrapposizione, imponendola pari al 70% (fig.5.5.2.2).

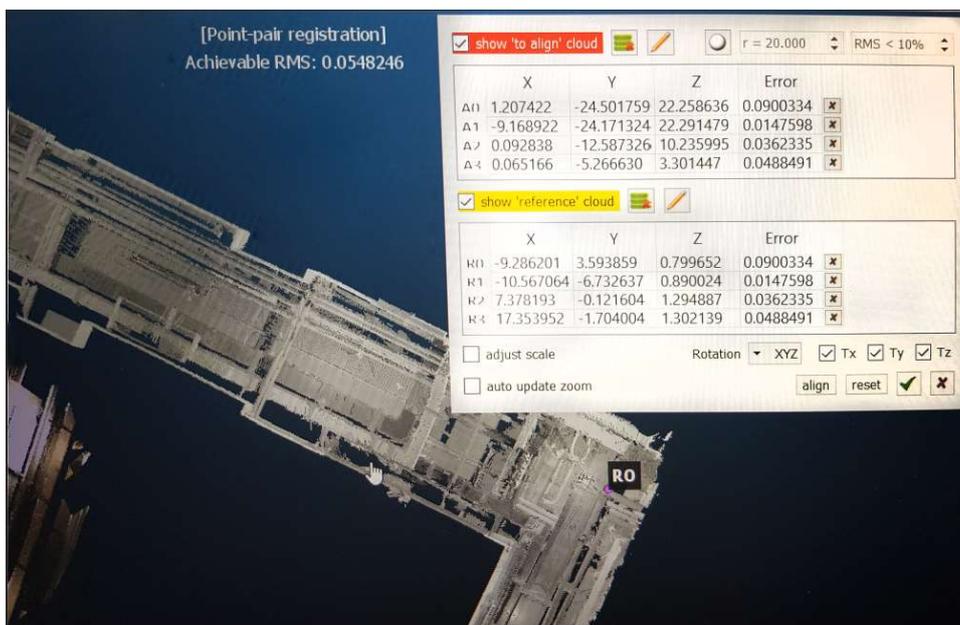


Fig.5.5.2.1 – Selezione punti sulla nuvola Lidar e F6 per la registrazione sul software CloudCompare

I risultati sono i seguenti:

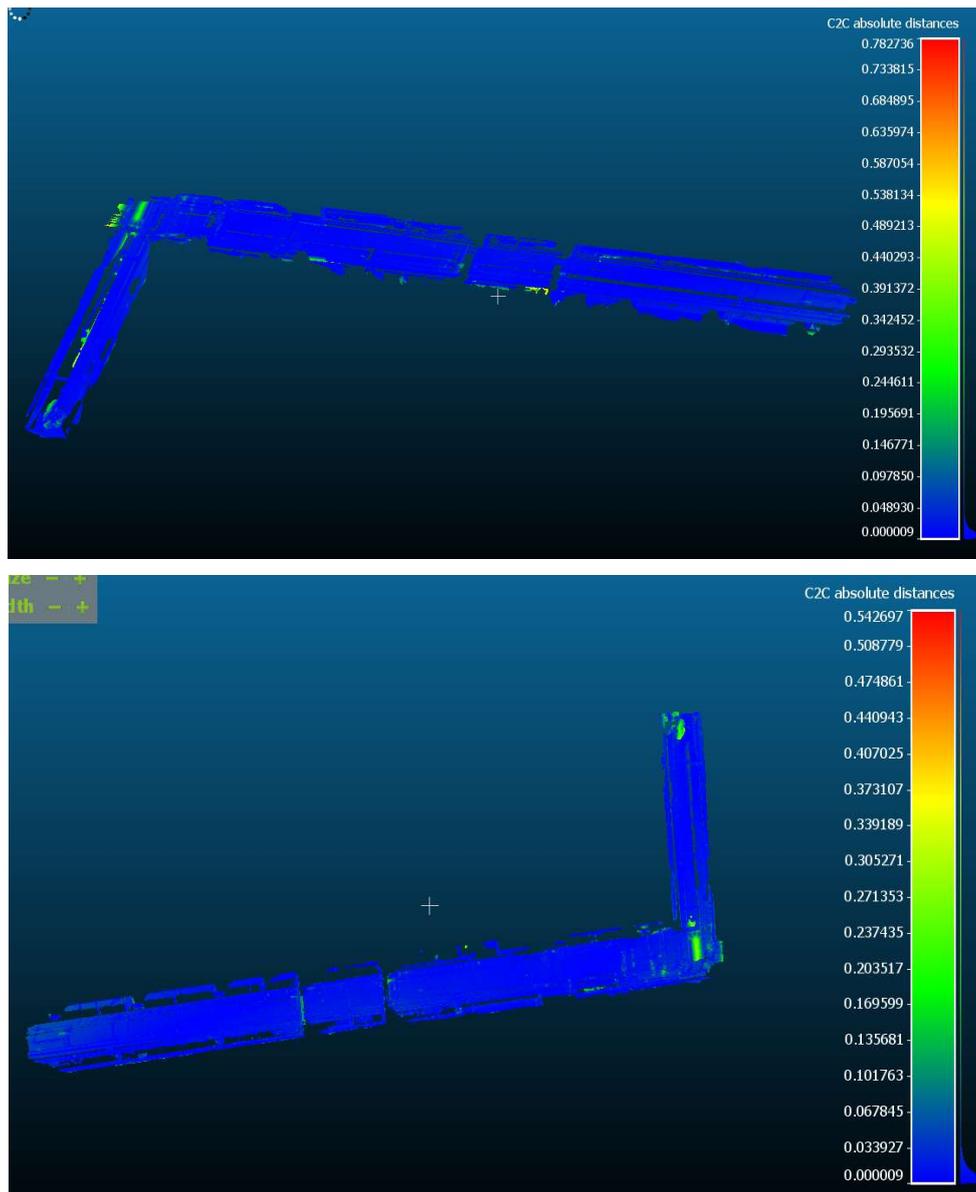
<pre>Align info ----- Final RMS : 0.00548246 ----- Transformation matrix 0.153  0.712  -0.685  23.311 0.988  -0.134  0.082  -2.730 -0.033 -0.689  -0.724  0.047 0.000  0.000  0.000  1.000 ----- Scale: fixed (1.0) ----- Refer to Console (F8) for more details</pre>	<pre>Register info ----- Final RMS : 0.0281439 (computed on 99999 points) ----- Transformation matrix 1.000  0.002  -0.001  0.013 -0.002  1.000  0.006  -0.018 0.001  -0.006  1.000  -0.023 0.000  0.000  0.000  1.000 ----- Scale: fixed (1.0) ----- Theoretical overlap : 70% ----- This report has been output to Console (F8)</pre>
--	---

**Fig.5.5.2.2** – Risultato RMS dell’allineamento per punti (a sinistra) e ICP (a destra)

Si ottiene uno scarto finale minore di 3 cm che è un buon risultato, paragonato a quello ottenuto con la scansione dell’armadio che ha una scala molto più piccola rispetto a quella del corridoio.

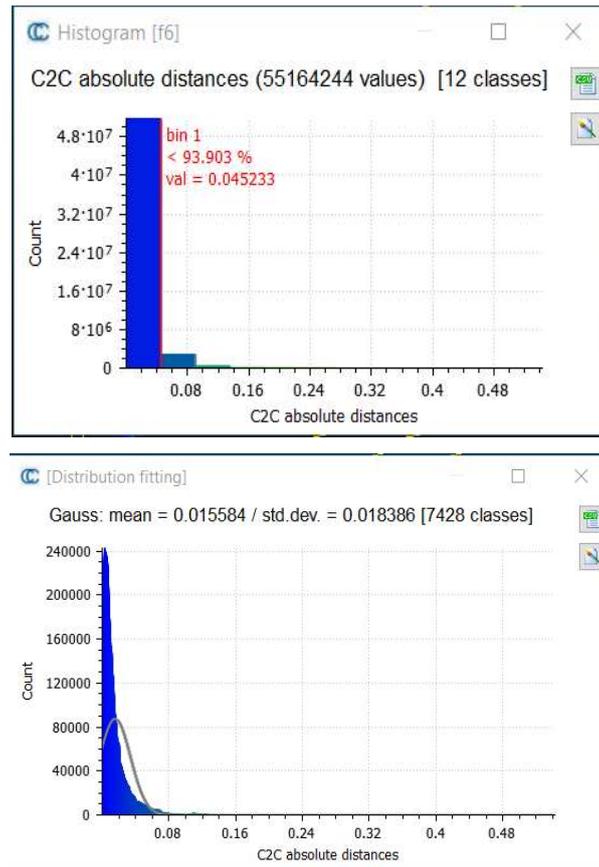
Un primo confronto tra le due nuvole è stato effettuato in riferimento alla loro distanza reciproca.

Per fare ciò si è utilizzato il comando “Cloud/Cloud dist” già usato in precedenza. Sono state selezionate le due nuvole che si vogliono confrontare, per computare la distanza effettiva tra i punti che le costituiscono. Il primo passaggio, valido per entrambe le superfici, è stato quello di isolare la porzione sulla quale andare ad effettuare il confronto attraverso l’apposito comando e solo in seguito avviando la procedura di “C2C” si andrà a selezionare la nuvola di riferimento (nel nostro caso la nuvola laser scanner) da cui computare la distanza. Dopo aver eseguito il comando e aver computato i parametri effettivi come descritto in precedenza, il risultato finale è rappresentato sulla scala di colori RGB che va dal blu al rosso, passando per il verde, in funzione dello scostamento tra i punti delle due nuvole computate (fig.5.5.2.3)



**Fig. 5.5.2.3** – Distanza tra le nuvole Lidar e F6 con corridoio visto dall'alto (sopra) e visto dal basso (sotto)

Dall' analisi delle immagini riportate possiamo notare come risultano più frequenti gli errori grossolani (giallo/rosso) in prossimità delle zone in cui non c'è sovrapposizione delle nuvole in quanto la nuvola è stata precedentemente segmentata. In particolare le zone dove la distanza risulta maggiore sono quelle in prossimità di cambi di direzione della scansione (incrocio dei due corridoi) e in prossimità delle zone terminali di scansione. Sono stati esportati anche gli istogrammi e la gaussiana che approssima l'andamento e la distribuzione delle distanze.



**Fig. 5.5.2.4 - Istogramma delle distanze e grafico della distribuzione gaussiana**

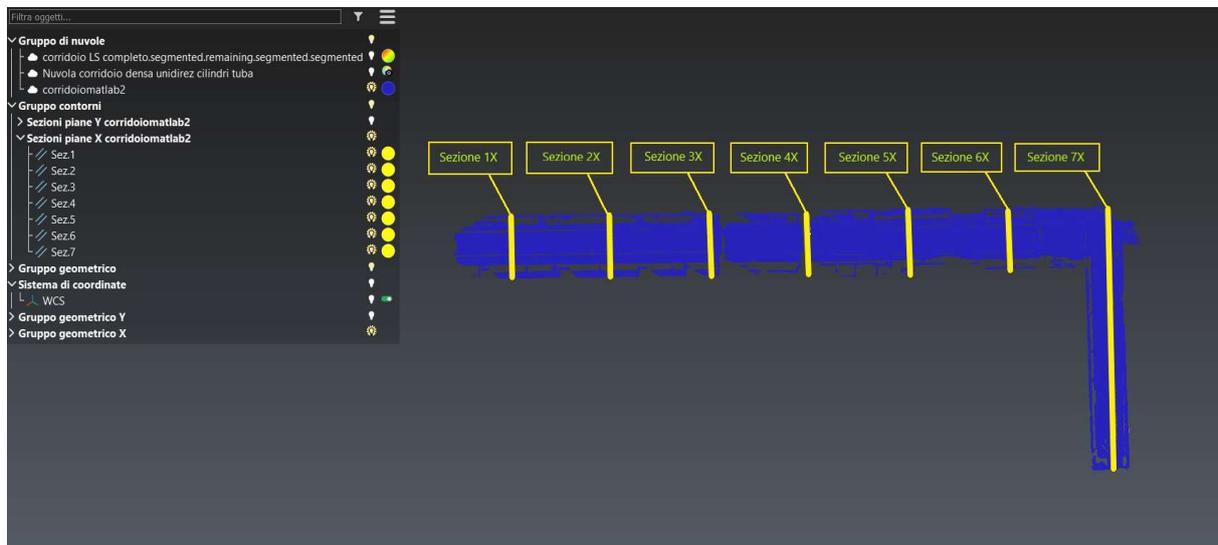
Quello che si deduce dalla valutazione dell'istogramma (fig. 5.5.2.4) è che la maggior parte nel numero di punti (circa il 93%) che sono stati analizzati ricade nel range di errore compreso tra 0 e 4,5 cm mentre errori più grossolani risultano via via meno frequenti considerando intervalli più rilevanti.

Tenendo conto di tutti i punti, si estrae una gaussiana con media e scarto che risultano intorno a 1,5 cm di grandezza. Confrontando il valore medio con quello della vetrina questo risulta essere tre volte più grande e, considerando la scala del problema, può considerarsi accettabile.

### 5.5.3 Elaborazione della nuvola F6 con 3DReshaper

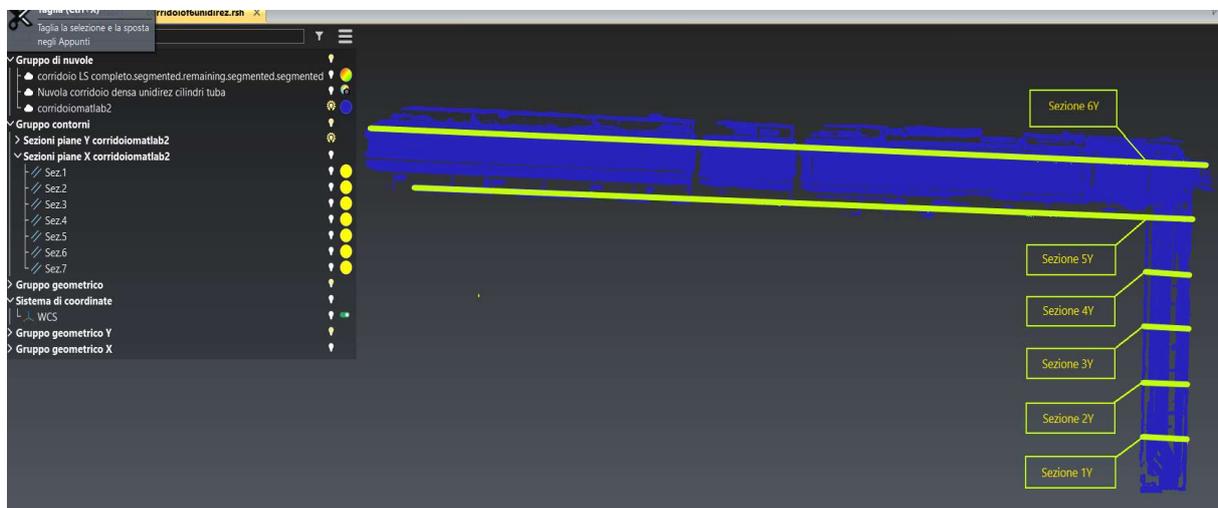
Il passo successivo è stato quello di analizzare le tubazioni all'interno del corridoio. Queste sono presenti principalmente nella parte alta, quasi a contatto con il soffitto. Per poter analizzare le sezioni delle tubazioni come fatto nelle prove precedenti, si è orientata la nuvola nel software CloudCompare in modo tale da avere i lati del corridoio paralleli agli assi X e Y del sistema di riferimento locale.

Inizialmente si è impiegato 3DReshape: dopo aver importato la nuvola nel formato libero “open”.e57 utilizzabile con tutti i programmi, si è andati a creare delle sezioni planari con la normale parallela all’asse X e Y in modo tale da sezionare le tubazioni presenti in entrambe le direzioni (fig.5.5.3.1).



**Fig. 5.5.3.1** – Rappresentazione sezioni corridoio lungo la direzione X

Le sezioni evidenziate in giallo sono state generate considerando un passo di cinque metri e ogni sezione è stata realizzata con un piano con “spessore” un centimetro per poter considerare più punti in corrispondenza di zone dove la tubazione non cambia dimensione. Per completezza viene riportato di seguito il risultato nell’altra direzione, dove si è adottato un passo di due metri (fig. 5.5.3.2).

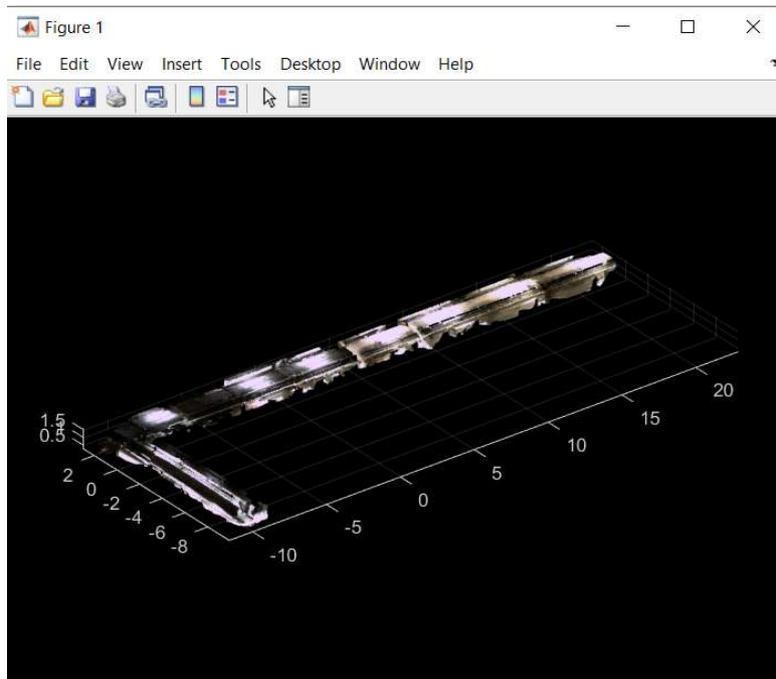


**Fig.5.5.3.2** – Rappresentazione sezioni corridoio lungo la direzione Y

Una volta generata la sezione sottoforma di poligonale, si è andati a individuare le sezioni circolari delle tubazioni facendo riferimento alla nuvola di partenza. Le circonferenze sono state generate utilizzando la funzione Adatta Cerchio presente all’interno del programma. I risultati sono stati riportati in forma tabellare (vedere paragrafo 5.5.6).

### 5.5.4 - Elaborazione della nuvola F6 con Matlab

Il software successivo utilizzato per il confronto è MATLAB. La nuvola, come per le prove precedenti, è stata importata in formato .pcd dopo averla convertita in CloudCompare (fig. 5.5.4.1)



**Fig. 5.5.4.1** – Rappresentazione corridoio in MATLAB

Nella prima parte del codice è presente l'informazione della posizione del piano di sezione mediante la coordinata lineare riferita al sistema di riferimento locale (sono anche presenti delle coordinate negative). Il codice è suddiviso in due parti per ogni direzione considerata:

- nella prima parte si è estratta la matrice contenente i punti del generico piano di sezione.
- nella seconda parte con un doppio ciclo annidato, sono state eliminate quelle parti di nuvola dove non è presente la sezione della tubazione; la funzione CircleFitByPratt calcola poi il centro della circonferenza e il suo raggio. Si riporta nell'allegato il codice di MATLAB utilizzato per la prova (All .to n.10). Il diagramma di flusso del codice è riportato in fig. 5.4.4.2. I risultati sono stati riportati nella stessa tabella dei risultati di 3DReshape per fare il confronto.

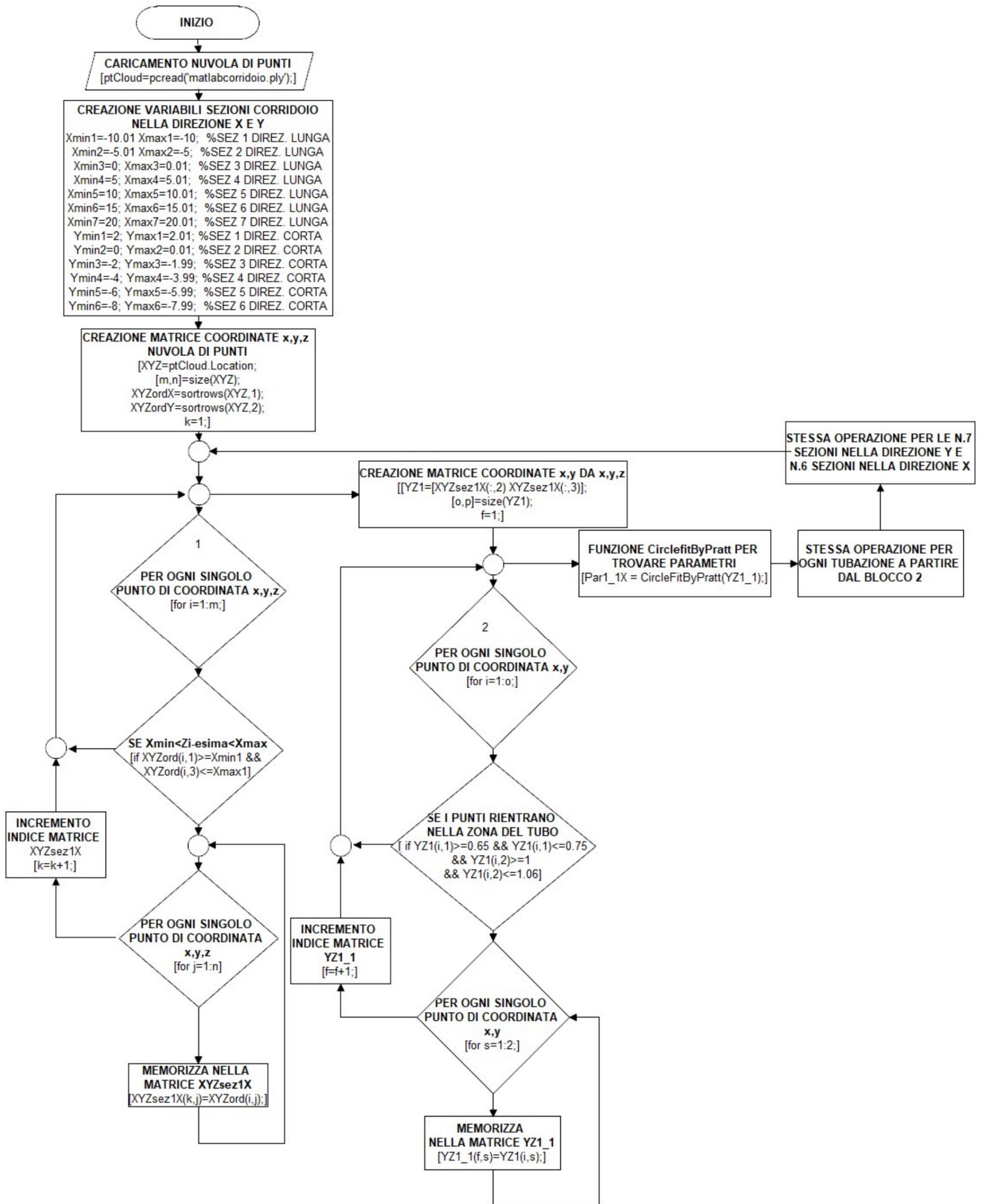


Fig. 5.4.4.2 - Diagramma di flusso script Matlab per parametri geometrici tubazioni

### 5.5.5 - Elaborazione della nuvola F6 con PCL

L'ultima elaborazione è stata fatta con le librerie PCL. Si è utilizzato un programma scritto in C++ elaborato partendo dal codice di due tutorial presenti nelle librerie PCL : il primo seleziona le parti della nuvola e il secondo classifica la geometria delle parti selezionate -piani o cilindri- utilizzando solo i cilindri per il modello 3D.

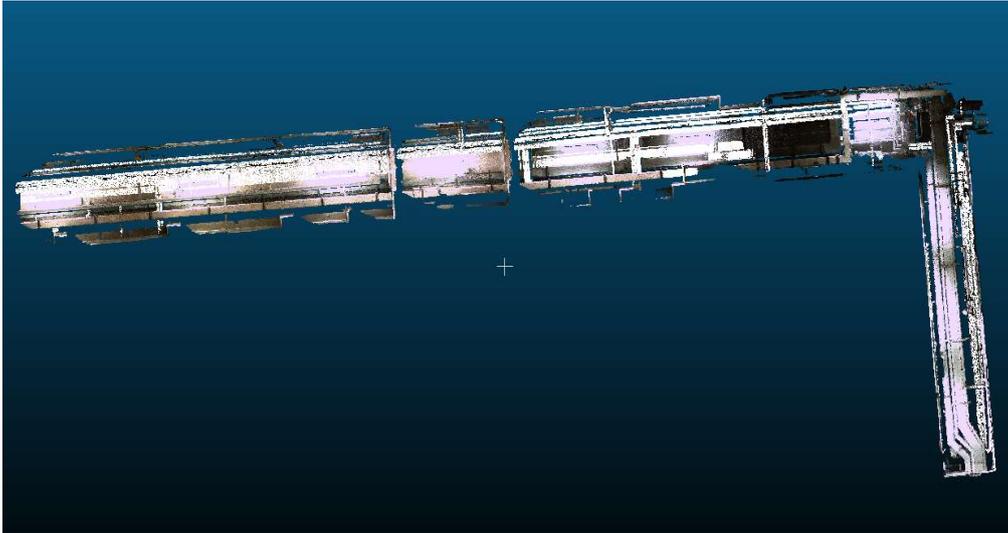
Le due parti del codice eseguono le seguenti procedure:

- la prima parte dell'algoritmo seleziona parti della nuvola e unisce i punti a distanza ravvicinata discriminandoli in base alla forma della superficie; ciò avviene confrontando gli angoli tra le normali alle superfici prese nell'intorno dei singoli punti. Viene denominato cluster un insieme di punti appartenenti ad una porzione di superficie omogeneamente liscia. Pertanto l'output di questa parte dell'algoritmo è il set di cluster (circa 600 cluster). Queste informazioni sono organizzate in file tipo .PCD.
- nella seconda parte dell'algoritmo vengono utilizzati i file .PCD ottenuti precedentemente e vengono classificati in base a due forme geometriche semplici: i cilindri e i piani. Le informazioni parametriche dei piani non vengono memorizzate, mentre l'output è rappresentato dai parametri dei cilindri stampati a schermo come nella prova n.4. Le nuvole sono salvate sottoforma di file con estensione .PCD.

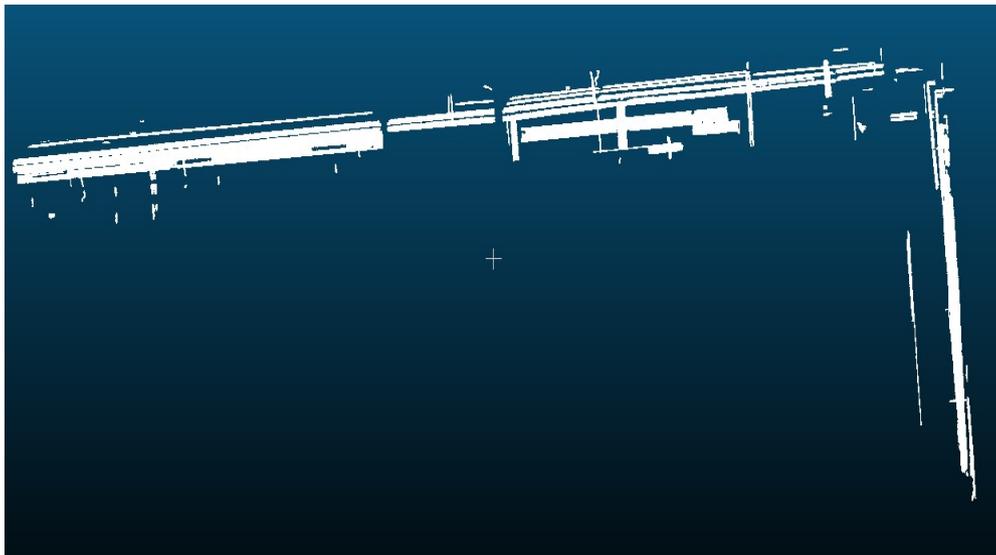
I dati di input sono costituiti da:

- la minima e massima dimensione dei cluster in numero di punti. Fondamentale è impostare correttamente la minima in quanto se il valore è troppo piccolo l'onere computazionale aumenta molto, mentre un valore troppo grande produce una nuvola poco dettagliata
- Il terzo dato di input è numero di punti vicini per individuare le parti di superficie su cui calcolare le normali. Se questo è troppo grande si rischia che tubazioni molto vicine tra loro vengano accorpate tra loro creando un'unica nuvola di punti.
- Il quarto dato è l'angolo in radianti che verrà utilizzato come intervallo consentito per la deviazione delle normali. Se la deviazione tra i punti normali è inferiore al parametro inserito, i punti si troveranno nello stesso cluster.
- Il quinto e ultimo dato di input è responsabile della soglia di curvatura di ogni superficie. Se due parti di superficie a cui appartengono i punti hanno le normali con angolazioni simili, viene verificata la differenza tra le loro curvature. Se questo valore è inferiore alla soglia di curvatura inserita, l'algoritmo considera i punti appartenenti allo stesso cluster.

Il codice utilizzato è riportato negli allegati (All.to n.11) mentre il diagramma di flusso che ne sintetizza il funzionamento è riportato in fig. 5.5.5.4



**Fig. 5.5.5.1** - Nuvola di punti del corridoio prima di utilizzare l'algoritmo



**Fig. 5.5.5.2** - Nuvola di punti del corridoio dopo l'utilizzo dell'algoritmo

Analizzando il risultato (fig. 5.5.5.2), si è notato che non tutte le superfici piane sono state rimosse dall'algoritmo e alcune tubazioni non sono state riconosciute. Il risultato comunque viene ritenuto attendibile in quanto sono state trovate almeno il 70% delle tubazioni. Si è provato a variare la densità originale della nuvola eseguendo n.3 sottocampionamenti per ottenere un grafico dei tempi di elaborazione dell'algoritmo. Le nuvole ottenute hanno:

- 19567520 punti
- 11346413 punti
- 6425146 punti

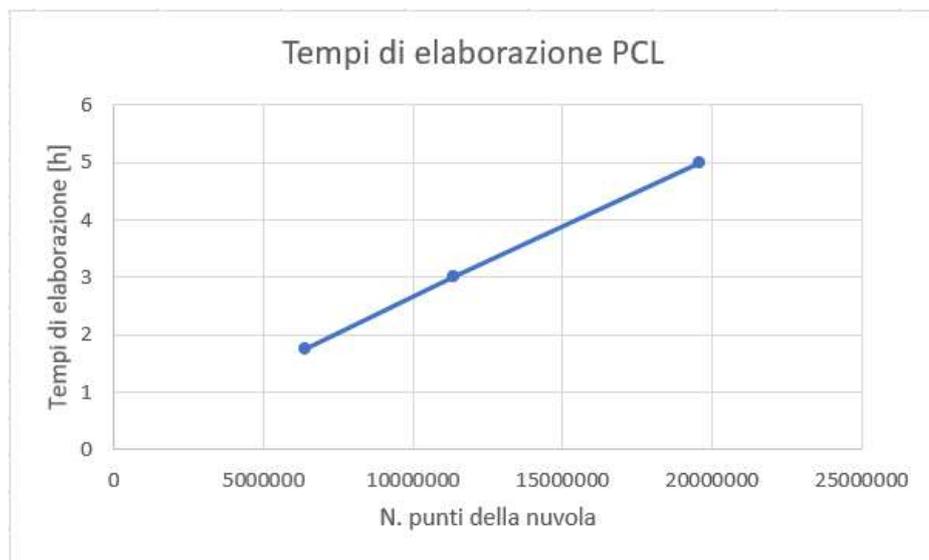
I rispettivi tempi di elaborazione della nuvola con l'algoritmo a parità di parametri sono:

- 5 ore
- 3 ore
- 1 ora e 45 min

Viene riportato il grafico dei tempi di elaborazione dove sull'asse delle ascisse troviamo i numeri di punti mentre sull'asse delle ordinate i tempi di elaborazione espressi in ore.

N. punti	tempi elaborazione [h]
19567520	5
11346413	3
6425146	1,75

**Tab. 5.5.5.1** - Tabella riassuntiva dei tempi di elaborazione



**Fig. 5.5.5.3** - Grafico tempi di elaborazione algoritmo PCL

Si nota che il trend del grafico è lineare e di conseguenza una volta che si ottengono i primi due punti delle n.2 elaborazioni iniziali, si possono stimare tutti i tempi di trattamento conoscendo il numero di punti.

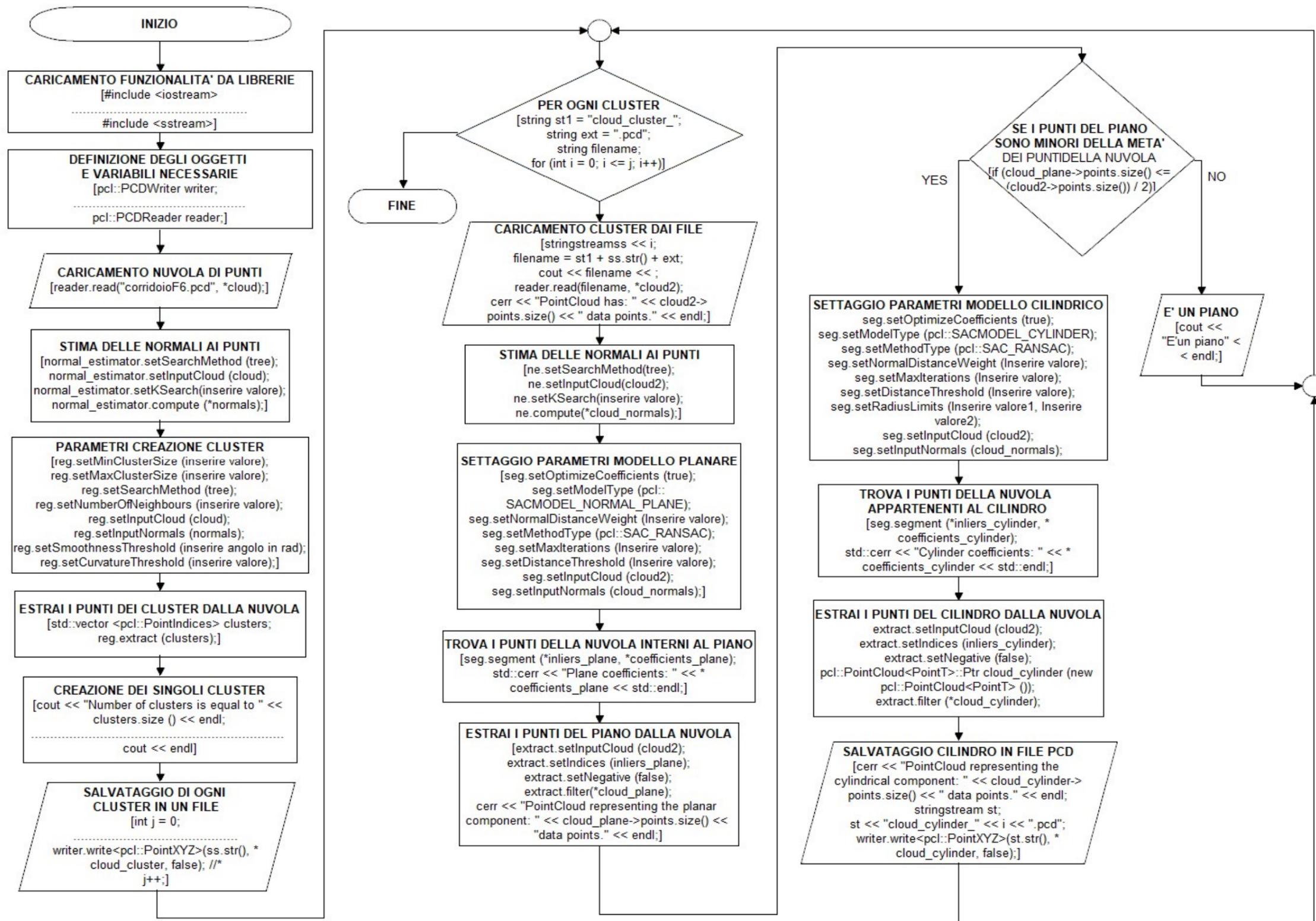


Fig. 5.5.5.4 - Diagramma di flusso script Matlab per parametri geometrici tubazioni

### 5.5.6 - Analisi risultati

Tubo	Raggi in mm della sezione 1 nel corridoio L=12 m					Tubo	Raggi in mm della sezione 2 nel corridoio L=12 m				
	Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm		Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm
Tubo 1 PE	27,5	28,1	40,1	31,9	7,1	Tubo 1 PE	39,8	37,7	40,1	39,2	1,3
Tubo 2 PE	31,5	29,4	40,2	33,7	5,7	Tubo 2 PE	40,2	39,8	40,2	40,1	0,2
Tubo 1 Zincato	47,5	46,8	50	48,1	1,7	Tubo 1 Zincato	47,9	47,8	50	48,6	1,2
Tubo	Raggi in mm della sezione 3 nel corridoio L=12 m					Tubo	Raggi in mm della sezione 4 nel corridoio L=12 m				
	Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm		Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm
Tubo 1 PE	40,4	39,1	/	39,8	0,9	Tubo 1 Zincato	49,0	50,5	/	49,8	1,1
Tubo 1 Zincato	51,0	49,9	/	50,5	0,8	Tubo 2 Zincato	61,8	61,4	60,2	61,1	0,8
Tubo 2 Zincato	61,1	60,5	60,2	60,6	0,5						
Tubo	Raggi in mm della sezione 5 nel corridoio L=12 m					Tubo	Raggi in mm della sezione 6 nel corridoio L=12 m				
	Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm		Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm
Tubo 1 PE	40,0	44,9	40,1	41,7	2,8	Tubo 1 Zincato	52,1	52,8	50	51,6	1,5
Tubo 1 Zincato	52,0	52,5	50	51,5	1,3						
Tubo 2 Zincato	60,7	60,3	60,2	60,4	0,3						
Tubo 3 Zincato	60	60,5	60,3	60,3	0,3						

Tab. 5.5.6.1 - Raggi delle tubazioni presenti nelle sezioni trasversali al corridoio con L=12 m

Tubo	Raggi PCL cilindri in mm nel corridoio L=12 m			
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Tubo 1 PE	/	/	/	/
Tubo 2 PE	/	/	/	/
Tubo 1 Zincato	49,4	50,9	52,3	/
Tubo 2 Zincato	60,9	61,3	59,8	/
Tubo 3 Zincato	59,3	/	/	/

Tab. 5.5.6.2 - Raggi delle tubazioni ottenuti con PCL nel corridoio con L=12 m

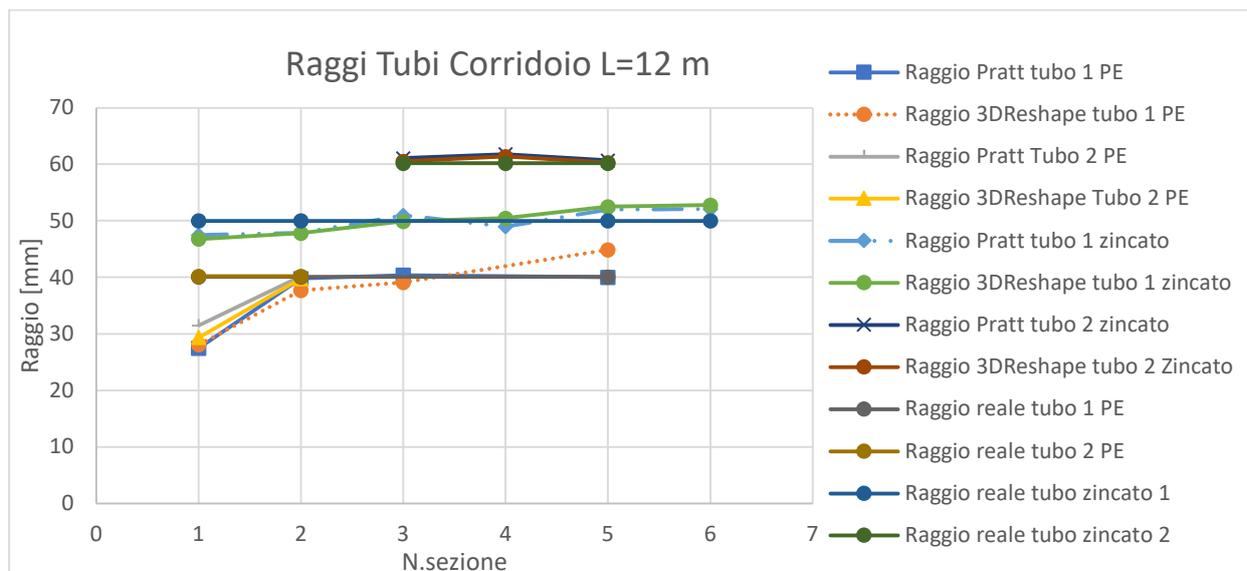


Fig. 5.5.6.1 Grafico dei raggi delle tubazioni presenti nelle sezioni trasversali al corridoio con L=12 m

Tubo	Raggi in mm della sezione 1 nel corridoio L=30 m					Tubo	Raggi in mm della sezione 2 nel corridoio L=30 m				
	Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm		Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm
Tubo 3 PE	56,2	56,5	58,2	57,0	1,1	Tubo 3 PE	58	57,2	58,2	57,8	0,5
Tubo 4 PE	91,9	92,2	90,2	91,4	1,1	Tubo 4 PE	79,4	80,7	80,1	80,1	0,7
Tubo 5 PE	94,2	94	90,4	92,9	2,1	Tubo 5 PE	82,7	82,6	80,2	81,8	1,4
Tubo 6 PE	42,5	41,9	40,1	41,5	1,2	Tubo 6 PE	33,7	34,6	40,1	36,1	3,5
Tubo 7 PE	44,6	44	40,3	43,0	2,3	Tubo 7 PE	41,7	40,8	40,3	40,9	0,7
Tubo	Raggi in mm della sezione 3 nel corridoio L=30 m					Tubo	Raggi in mm della sezione 4 nel corridoio L=30 m				
	Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm		Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm
Tubo 4 PE	84,2	83,6	80,1	82,6	2,2	Tubo 4 PE	82,4	83,1	80,3	81,9	1,5
Tubo 5 PE	82,9	83,3	80,2	82,1	1,7	Tubo 5 PE	85,8	86,7	80,1	84,2	3,6
Tubo 6 PE	58,7	58,1	40,1	52,3	10,6	Tubo 6 PE	30,3	31,2	40,1	33,9	5,4
Tubo 7 PE	45,5	46,1	40,3	44,0	3,2						
Tubo	Raggi in mm della sezione 5 nel corridoio L=30 m					Tubo	Raggi in mm della sezione 6 nel corridoio L=30 m				
	Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm		Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm
Tubo 4 PE	63,3	64,1	64,1	63,8	0,5	Tubo 4 PE	50,9	51,4	50,1	50,8	0,7
Tubo 5 PE	64,1	64,9	64,3	64,4	0,4	Tubo 5 PE	53,3	52,8	50,3	52,1	1,6
Tubo 6 PE	39,6	38,8	40,1	39,5	0,7	Tubo 6 PE	43,4	42,9	40,1	42,1	1,8
Tubo 7 PE	40,5	39,6	40,3	40,1	0,5	Tubo 7 PE	39,6	40,2	40,3	40,0	0,4
Tubo 4 Zincato	34,3	35,4	32,2	34,0	1,6						
Tubo	Raggi in mm della sezione 7 nel corridoio L=30 m					Tubo	Raggi in mm della sezione 8 nel corridoio L=30 m				
	Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm		Pratt	3DReshaper	Reale	Media	Sqm
Tubo 6 PE	39	40,2	40,1	39,8	0,7						
Tubo 7 PE	40,6	40,9	40,3	40,6	0,3						

Tab. 5.5.6.3 - Raggi delle tubazioni presenti nelle sezioni trasversali al corridoio con L=30 m

Tubo	Raggi PCL cilindri in mm nel corridoio L=30 m			
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Tubo 3 PE	/	/	/	/
Tubo 4 PE	85,5	73,3	51,1	/
Tubo 5 PE	88,1	75,6	54	/
Tubo 6 PE	39,1	43,3	39,8	/
Tubo 7 PE	43,7	40,1	41,3	/

Tab 5.5.6.4 - Raggi delle tubazioni ottenuti con PCL nel corridoio con L=30 m

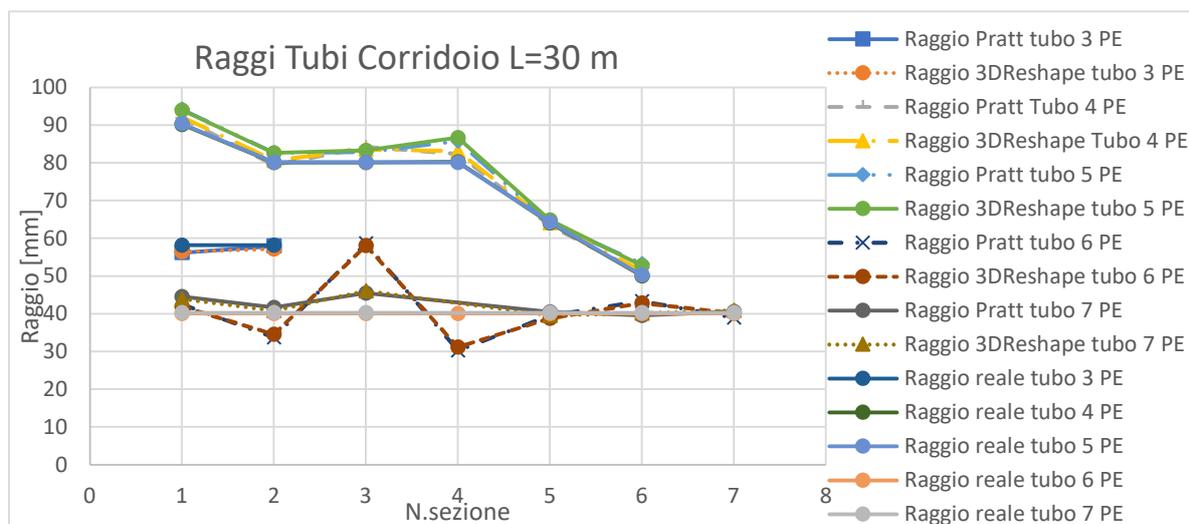
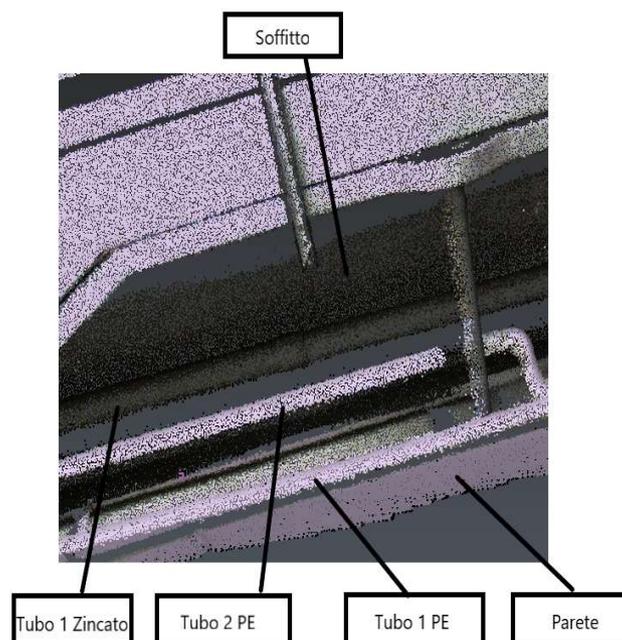


Fig. 5.5.6.2 Grafico dei raggi delle tubazioni presenti nelle sezioni trasversali al corridoio con L=30 m

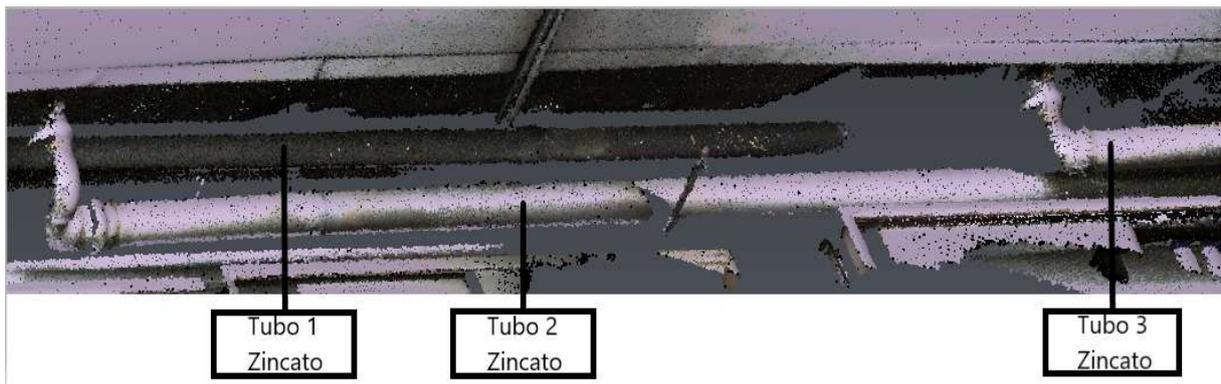
Nella tab. 5.5.6.1 sono riportati i raggi delle tubazioni presenti nelle sezioni trasversali al corridoio con lunghezza pari a 12 metri. Ogni tubazione è distinta da un numero che la identifica in maniera univoca rispetto alle altre e dal materiale. I due materiali che contraddistinguono le tubazioni rilevate in campo sono una lega metallica zincata e un rivestimento in polietilene (PE), entrambi materiali poco riflettenti. Si può notare inoltre che alcuni valori reali misurati tramite calibro non sono presenti perché non è stato possibile effettuare la misura. Nella tabella sono stati evidenziati in rosso, per ogni sezione, gli scarti quadratici medi più alti confrontando i singoli valori di ogni tubazione. Dai valori si deduce che la tubazione 1 che si trova nella parte sinistra della fig. 5.5.6.3 presenta i valori più alti in termine di scarto quadratico medio poiché si trova a diretto contatto con la parete. Lo strumento infatti ha acquisito pochi punti della tubazione 1 essendoci molte zone coperte e questo ha portato ad un'incertezza più grande nella misura del raggio della tubazione 1. Si nota che lo scarto tende ad aumentare passando dalla sezione 1 alla sezione 3 fino ad arrivare a un picco di circa 10 mm in quanto la tubazione tra la sezione 1 e la sezione 2 ha cambiato direzione essendosi spostata verso la parete di sinistra.

Nella tab. 5.5.6.2 e 5.5.6.4 sono riportati i valori dei raggi dei modelli cilindrici generati dal codice PCL. Per ogni singola tubazione si possono avere diversi cluster, ovvero ogni tubazione può essere suddivisa in più parti con diversi parametri per la presenza di zone di discontinuità nella nuvola di punti.

Nella tab. 5.5.6.3 si evince che la tubazione 6 e 7 sono quelle che hanno lo scarto quadratico medio più alto fino ad un picco massimo di 10 mm. Entrambe si trovano nella parte sinistra del corridoio rispetto alla direzione di scansione e, dato che lo strumento è rimasto in posizione centrale durante la scansione lungo il corridoio, ne conviene che le tubazioni 6 e 7 hanno un limitato numero di punti tale per cui ci sono delle sezioni (per esempio la sezione 3 in cui si ha uno sqm di 10 mm) in cui i valori dei raggi stimati possono essere molto diversi rispetto ai valori reali.



**Fig. 5.5.6.3** - Tubazioni corridoio di lunghezza 12 metri



**Fig. 5.5.6.4** - Tubazioni corridoio di lunghezza 12 metri



**Fig. 5.5.6.5** - Tubazioni corridoio di lunghezza 30 metri

## Conclusioni

La ricostruzione tridimensionale del costruito è un ambito di ricerca molto studiato in quanto costituisce parte di notevole importanza per avere a disposizione modelli 3D non solo per la progettazione ma per avere a disposizione un archivio di dati per gestire tutte le fasi successive di esistenza del costruito.

La parte impiantistica negli edifici necessita di modelli “as built” utili ad ogni successiva attività di gestione, adeguamento, manutenzione o ampliamento.

Questo lavoro di tesi è stato eseguito per :

- Testare in termini di range di velocità e di precisione se lo strumento a luce strutturata F6 Smart Mantis Vision può condurre a risultati attendibili per ottenere modelli “as built” di oggetti ed in particolare di impianti tecnici (idraulici ed elettrici). Lo strumento a luce strutturata ha un costo nettamente inferiore ad un laser scanner.
- Analizzare le modalità di restituzione delle nuvole di punti utili per la costruzione di modelli 3D “as built” forniti da due diversi tipi di strumenti , ovvero uno strumento a luce strutturata e un laser scanner a differenza di fase (F6 Smart Mantis Vision e Faro Focus Cam2 120s rispettivamente). Gli strumenti inizialmente restituiscono delle nuvole di punti grezze (raw point cloud).
- Trattare le nuvole di punti mediante operazioni di pulitura, filtraggio, allineamento e unione con l’aiuto di software specifici dedicati.
- Valutare i tempi di scansione e di trattamento delle nuvole di punti.
- Valutare in termini di scarto quadratico medio se dall’acquisizione delle nuvole di punti si possono ricavare dei valori dei parametri geometrici che si avvicinino ai valori reali.

Dai test nelle diverse prove si sono ricavate le seguenti conclusioni:

- Nella prova n.1 e n.2 si è visto che le condizioni di luce ambientali e le caratteristiche dei materiali (superfici riflettenti) sono fondamentali per il corretto rilevamento di oggetti con strumento a luce strutturata.
- Nella prova n.3 unendo e confrontando le nuvole degli strumenti sono stati evidenziati vantaggi e svantaggi di entrambi: il laser scanner rileva distintamente la presenza di vetri ed oggetti collocati oltre superfici vetrate, mentre con la luce strutturata non si ottiene una rappresentazione accettabile. Si è visto che per oggetti di piccole e medie dimensioni, a parità di tempistiche delle scansioni ed elaborazioni con i due strumenti, è più conveniente utilizzare il laser scanner per il livello di dettaglio ottenuto.
- Nella prova n.4 si è concluso che a partire dalla nuvola di punti del tubo portaprogetti di riferimento con raggio nominale pari a 40 mm sviluppato a 90°, si inizia ad avere una

variazione del raggio importante pari a 0,5 cm che arriva a un valore di 2 cm per un tubo sviluppato a 45°.

- Nella prova n.5 si è concluso che nella valutazione del raggio delle tubazioni, a partire da una quota di 3,2 m rispetto al sistema di riferimento locale si ha una variazione significativa del valore del raggio (fino a valori di 1 cm).
- Nella prova n.6 si è visto che per oggetti di dimensioni maggiori, come le tubazioni del corridoio interrato di lunghezza pari a 42 m, le tempistiche di elaborazione e scansione per ottenere le nuvole con lo strumento a luce strutturata risultano essere minori del 20-25% rispetto alle tempistiche del laser scanner.
- Sempre nella prova 6 nel rilievo delle tubazioni presenti sul soffitto del corridoio la zona di analisi deve essere esclusivamente estesa al soffitto stesso, per cui con la luce strutturata si può concentrare la scansione nella sola zona da rilevare; al contrario il laser scanner, con i movimenti dello specchio, rileva tutto lo spazio circostante: quindi è necessario successivamente segmentare la nuvola che determina un allungamento dei tempi per ottenere il modello. Nel rilievo delle tubazioni collocate ad una distanza pari a circa 3,5 metri dallo strumento a luce strutturata, nella maggior parte delle sezioni si sono registrati valori di scarto quadratico medio compresi tra 5 e 10 mm.

I risultati ottenuti in seguito alle prove effettuate e al processamento dei dati con i diversi software sono positivi per la precisione ottenuta che nel caso migliore si è attestata su valori di 0,1 mm nella prova n.5.

Rimane aperto il problema del rilevamento di oggetti con superfici riflettenti e vetrate mediante lo strumento a luce strutturata.

Per questi motivi, si auspica un miglioramento nella modalità di implementazione del trasmettitore infrarosso e relativo ricevitore degli strumenti a luce strutturata al fine di migliorare ed eliminare le problematiche relative alla riflessione del segnale trasmesso.

Avanzamenti futuri nel progetto dei modelli comprendono sicuramente anche il miglioramento dell'implementazione software per eseguire le operazioni in tempi minori: in numerosi processi di elaborazioni ed esecuzione il software ECHO dello strumento a luce strutturata ha mostrato limiti non accettabili per continui arresti con necessità di ripetere l'elaborazione della nuvola di punti.

## Bibliografia e Sitografia

- [1] CMM-Clifford W.Kenned, Edward G. Hoffman, Steven D. Bond - 198 - Industrial Press Inc., 200 Madison Avenue-New York  
[Online] Available: <https://www.sharemind.eu/scansione3d.html>
- [2] [Online] Available: <https://3dmetrica.it/lunghezza-focale-in-fotogrammetria/>
- [3] [Online] Available: <http://www.zappino.it/wp-content/uploads/2011/02/La-visione-stereoscopica.pdf>
- [4] [Online] Available: <https://www.visionarea.net/contapersone/0-sensore-binoculare-3d-s2/sensore-binoculare-3d-s2.kl>
- [5] [Online] Available: <http://www.treccani.it/enciclopedia/stereoscopia/>
- [6] [Online] Available: <https://www.3d-archeolab.it/2017/04/tutorial-la-fotogrammetria-automatica->
- [7] [Online] Available: <https://www.archeomatica.it/eventi/fortezza-da-basso-rilievo-critico-verificato-conservazione-primi-risultati-prospettive-future-FOTOGRAMMETRIA>
- [8] [Online] Available: <https://3dmetrica.it/ortofoto/>
- [9] [Online] Available: <https://www.faro.com/it-it/prodotti/costruzione-bim-cim/cam2-focus/>
- [10] [Online] Available: <https://3dmetrica.it/pulizia-nuvola-di-punti/>
- [11] [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ggYRR-2lclc>
- [12] [Online] Available: [http://www.rilievodigitale.com/tutorial\\_Autodesk\\_Recap\\_nuvole\\_di\\_punti\\_-\\_Rilievo\\_Digitale.pdf](http://www.rilievodigitale.com/tutorial_Autodesk_Recap_nuvole_di_punti_-_Rilievo_Digitale.pdf)
- [13] [Online] Available: Mantis-Vision-F6-SMART-User-Guide-Rev.-2.0.1-18Nov18
- [14] Ing. Mauro Valfredi – “Ingegneria del costruito e sviluppo dell’impiantistica”-Smart Building Roadshow-Vicenza aprile 2018
- [15] M.Cominacini-Bollettino SIFET n.3 – 1991 “Estratto dall’articolo scientifico : i distanziometri elettronici topografici”
- [16] Matteo Sgrenzaroli-Giorgio Vassena-“Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner”- Volume 1 – Introduzione Generale
- [17] Daniele Bertolucci- “Principi di laser scanning 3D”- Editore Flaccovio Dario-gennaio 2009
- [18] Kraus K., “Fotogrammetria. Vol. 1 - Teoria e applicazioni”, Libreria Universitaria Levrotto & Bella, Torino 1994.
- [19] Cannarozzo R., Cucchiarini L., Meschieri V., “La presa dei fotogrammi” in

“Misure, rilievo, progetto”, Zanichelli, Bologna 2012.

[20] Cannarozzo R., Cucchiarini L., Meschieri V., “Principi e strumenti della fotogrammetria” in “Misure, rilievo, progetto”, Zanichelli, Bologna 2012.

[21] Cannarozzo R., Cucchiarini L., Meschieri V., “Il rilievo topografico” in “Misure, rilievo, progetto”, Zanichelli, Bologna 2012.

## Fonti figure tesi

[1] Fig. 1.3.1 : <https://www.01building.it/bim/lod-progettazione-bim/>

[2] Fig. 2.2.2.1 : <https://it.wikipedia.org/wiki/Interferometria>

[3] Fig. 2.2.4.1 : <http://www.geomaticaeconservazione.it/archivi/Scansioni3D.pdf>

[4] Fig. 2.3.1.1 : <https://it.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetria>

[5] Fig. 2.3.1.2 : <https://it.wikipedia.org/wiki/Stereogramma>

[6] Fig. 2.3.1.3 : [https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli\\_Cannarozzo\\_Principi\\_e\\_strumenti\\_fotogrammetria.pdf](https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Principi_e_strumenti_fotogrammetria.pdf)

[7] Fig. 2.3.1.4 : <http://www.globi.com/it/news/fotogrammetria-di-prossimita-modelli-3d-affidabili-e-immediati/>

[8] Fig. 2.3.1.5 : [https://mantuadesignstudio.files.wordpress.com/2016/09/6\\_il-rilievo-fotogrammetrico\\_taffurelli.pdf](https://mantuadesignstudio.files.wordpress.com/2016/09/6_il-rilievo-fotogrammetrico_taffurelli.pdf)

[9] Fig. 2.3.1.6 : [https://mantuadesignstudio.files.wordpress.com/2016/09/6\\_il-rilievo-fotogrammetrico\\_taffurelli.pdf](https://mantuadesignstudio.files.wordpress.com/2016/09/6_il-rilievo-fotogrammetrico_taffurelli.pdf)

[10] Fig. 2.4.1.1 : [http://www.archeomatica.unict.it/Stanco\\_OKOA.pdf](http://www.archeomatica.unict.it/Stanco_OKOA.pdf)

[11] Fig. 2.4.2.1 : <https://www.acronico.it/2019/10/28/e-luce-fu/>

[12] Fig. 2.4.2.2 : <http://flaccovio.geoexpo.it/DF8623.pdf>

[13] Fig. 2.5.1.1 : [https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring\\_machine](https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine)

[14] Fig. 3.4.1 : [https://it.wikipedia.org/wiki/Laser\\_scanner](https://it.wikipedia.org/wiki/Laser_scanner)

[15] Tab. 3.4.1 : [http://www.geomaticaeconservazione.it/archivi/DispensaGeCo\\_SistemiScansione3D\\_dic2011.pdf](http://www.geomaticaeconservazione.it/archivi/DispensaGeCo_SistemiScansione3D_dic2011.pdf)

[16] Fig. 3.5.1.1 : <https://mantis-vision.com/professional-solutions/f6-smart-about/>

[17] Fig. 3.5.2.1 : <https://streambend.net/laser-scanning/>

## Allegati

### All.to n.1 Funzione di Pratt per la determinazione del raggio e delle coordinate del centro del cerchio delle tubazioni

**INPUT:** Matrice coordinate della sezione del cerchio nel generico piano

**OUTPUT:** Vettore Par : Parametri geometrici del cerchio (raggio e coordinate centro delle sezioni)

```
function Par = CircleFitByPratt(XY)
%
% Circle fit by Pratt
% V. Pratt, "Direct least-squares fitting of algebraic surfaces",
% Computer Graphics, Vol. 21, pages 145-152 (1987)
%
% Input: XY(n,2) is the array of coordinates of n points x(i)=XY(i,1), y(i)=XY(i,2)
%
% Output: Par = [a b R] is the fitting circle:
% center (a,b) and radius R
%
% Note: this fit does not use built-in matrix functions (except "mean"),
% so it can be easily programmed in any programming language
%
%-----
n = size(XY,1); % number of data points
centroid = mean(XY); % the centroid of the data set
% computing moments (note: all moments will be normed, i.e. divided by n)
Mxx=0; Myy=0; Mxy=0; Mxz=0; Myz=0; Mzz=0;
for i=1:n
Xi = XY(i,1) - centroid(1); % centering data
Yi = XY(i,2) - centroid(2); % centering data
Zi = Xi*Xi + Yi*Yi;
Mxy = Mxy + Xi*Yi;
Mxx = Mxx + Xi*Xi;
Myy = Myy + Yi*Yi;
Mxz = Mxz + Xi*Zi;
Myz = Myz + Yi*Zi;
Mzz = Mzz + Zi*Zi;
end
```

```

Mxx = Mxx/n;
Myy = Myy/n;
Mxy = Mxy/n;
Mxz = Mxz/n;
Myz = Myz/n;
Mzz = Mzz/n;
% computing the coefficients of the characteristic polynomial
Mz = Mxx + Myy;
Cov_xy = Mxx*Myy - Mxy*Mxy;
Mxz2 = Mxz*Mxz;
Myz2 = Myz*Myz;
A2 = 4*Cov_xy - 3*Mz*Mz - Mzz;
A1 = Mzz*Mz + 4*Cov_xy*Mz - Mxz2 - Myz2 - Mz*Mz*Mz;
A0 = Mxz2*Myy + Myz2*Mxx - Mzz*Cov_xy - 2*Mxz*Myz*Mxy + Mz*Mz*Cov_xy;
A22 = A2 + A2;
epsilon=1e-12;
ynew=1e+20;
IterMax=20;
xnew = 0;
% Newton's method starting at x=0
for iter=1:IterMax
    yold = ynew;
    ynew = A0 + xnew*(A1 + xnew*(A2 + 4.*xnew*xnew));
    if (abs(ynew)>abs(yold))
        disp('Newton-Pratt goes wrong direction: |ynew| > |yold|');
        xnew = 0;
        break;
    end
    Dy = A1 + xnew*(A22 + 16*xnew*xnew);
    xold = xnew;
    xnew = xold - ynew/Dy;
    if (abs((xnew-xold)/xnew) < epsilon), break, end
    if (iter >= IterMax)
        disp('Newton-Pratt will not converge');
        xnew = 0;
    end
    if (xnew<0.)

```

```

        fprintf(1,'Newton-Pratt negative root: x=%f\n',xnew);
        xnew = 0;
    end
end

% computing the circle parameters
DET = xnew*xnew - xnew*Mz + Cov_xy;
Center = [Mxz*(Myy-xnew)-Myz*Mxy , Myz*(Mxx-xnew)-Mxz*Mxy]/DET/2;
Par = [Center+centroid , sqrt(Center*Center'+Mz+2*xnew)];
end % CircleFitByPratt

```

## All.to n .2 Codice Matlab tubo portaoggetti

**INPUT: Nuvola di punti del tubo portaoggetti in formato .ply**

**OUTPUT: Vettore RS : Parametri geometrici del tubo (raggio e coordinate centro delle sezioni)**

```

-----
//Caricamento della nuvola di punti//
ptCloud=pcread('nuvolatubo.ply');
-----

//Coordinate Xmin e Xmax del piano di sezione con spessore pari a 1 cm//
Xmin1=-0.331602; %SEZ 1
Xmax1=-0.321602; %SEZ 1
Xmin2=-0.251602; %SEZ 2
Xmax2=-0.241602; %SEZ 2
Xmin3=-0.171602; %SEZ 3
Xmax3=-0.161602; %SEZ 3
Xmin4=-0.091602; %SEZ 4
Xmax4=-0.081602; %SEZ 4
Xmin5=-0.011602; %SEZ 5
Xmax5=-0.001602; %SEZ 5
Xmin6=0.068398; %SEZ 6
Xmax6=0.078398; %SEZ 6
Xmin7=0.148398; %SEZ 7
Xmax7=0.158398; %SEZ 7
Xmin8=0.228398; %SEZ 8
Xmax8=0.238398; %SEZ 8
Xmin9=0.308398; %SEZ 9
Xmax9=0.318398; %SEZ 9

```

```
-----  
//Estrazione delle coordinate x,y,z della nuvola di punti nella matrice XYZ//
```

```
XYZ=ptCloud1.Location;
```

```
[m,n]=size(XYZ);
```

```
XYZord=sortrows(XYZ,1);  
-----
```

```
//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno dei 9 piani di sezione e calcolo parametri geometrici//
```

```
k=1;
```

```
for i=1:m;
```

```
    if XYZord(i,1)>=Xmin1 && XYZord(i,1)<=Xmax1
```

```
        for j=1:n
```

```
            XYZsez1(k,j)=XYZord(i,j);
```

```
        end
```

```
        k=k+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
YZ1=[XYZsez1(:,2) XYZsez1(:,3)];
```

```
RS1 = CircleFitByPratt(YZ1);
```

```
k=1;
```

```
for i=1:m;
```

```
    if XYZord(i,1)>=Xmin2 && XYZord(i,1)<=Xmax2
```

```
        for j=1:n
```

```
            XYZsez2(k,j)=XYZord(i,j);
```

```
        end
```

```
        k=k+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
YZ2=[XYZsez2(:,2) XYZsez2(:,3)];
```

```
RS2 = CircleFitByPratt(YZ2);
```

```
k=1;
```

```
for i=1:m;
```

```
    if XYZord(i,1)>=Xmin3 && XYZord(i,1)<=Xmax3
```

```
        for j=1:n
```

```
            XYZsez3(k,j)=XYZord(i,j);
```

```
        end
```

```
        k=k+1;
```

```

        end
    end
    YZ3=[XYZsez3(:,2) XYZsez3(:,3)];
    RS3 = CircleFitByPratt(YZ3);
    k=1;
    for i=1:m;
        if XYZZord(i,1)>=Xmin4 && XYZZord(i,1)<=Xmax4
            for j=1:n
                XYZsez4(k,j)=XYZZord(i,j);
            end
            k=k+1;
        end
    end
    end
    YZ4=[XYZsez4(:,2) XYZsez4(:,3)];
    RS4 = CircleFitByPratt(YZ4);
    k=1;
    for i=1:m;
        if XYZZord(i,1)>=Xmin5 && XYZZord(i,1)<=Xmax5
            for j=1:n
                XYZsez5(k,j)=XYZZord(i,j);
            end
            k=k+1;
        end
    end
    end
    YZ5=[XYZsez5(:,2) XYZsez5(:,3)];
    RS5 = CircleFitByPratt(YZ5);
    k=1;
    for i=1:m;
        if XYZZord(i,1)>=Xmin6 && XYZZord(i,1)<=Xmax6
            for j=1:n
                XYZsez6(k,j)=XYZZord(i,j);
            end
            k=k+1;
        end
    end
    end
    YZ6=[XYZsez6(:,2) XYZsez6(:,3)];
    RS6 = CircleFitByPratt(YZ6);

```

```

k=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,1)>=Xmin7 && XYZord(i,1)<=Xmax7
        for j=1:n
            XYZsez7(k,j)=XYZord(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ7=[XYZsez7(:,2) XYZsez7(:,3)];
RS7 = CircleFitByPratt(YZ7);
k=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,1)>=Xmin8 && XYZord(i,1)<=Xmax8
        for j=1:n
            XYZsez8(k,j)=XYZord(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ8=[XYZsez8(:,2) XYZsez8(:,3)];
RS8 = CircleFitByPratt(YZ8);
k=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,1)>=Xmin9 && XYZord(i,1)<=Xmax9
        for j=1:n
            XYZsez9(k,j)=XYZord(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ9=[XYZsez9(:,2) XYZsez9(:,3)];
RS9 = CircleFitByPratt(YZ9);

```

---

COMMENTO: Il primo passaggio è caricare la nuvola di punti in formato .ply . Si è scelta la coordinata (in questo caso l'ascissa) lungo l'asse del tubo in corrispondenza del piano di sezione. Con un apposito comando si è estratta l'informazione numerica delle coordinate x,y,z nello spazio rispetto a un sistema

di riferimento locale generato dal software ECHO al momento della creazione della nuvola. Dopo aver riordinato i valori della matrice delle coordinate rispetto alla coordinata x, si è creato un doppio ciclo annidato in modo da ottenere tutti i parametri necessari.

Il risultato finale viene memorizzato nella variabile vettoriale RS che deriva dalla funzione CirclefitbyPratt (All. to n.1) in cui vengono riportate le coordinate y,z del centro della sezione circolare e il raggio.

### **All.to n .3 Codice PCL tubo porta-progetti**

**INPUT: Nuvola di punti del tubo porta-progetti in formato .pcd**

**OUTPUT: Parametri geometrici del tubo (raggio e coordinate centro delle basi del cilindro)**

```
-----  
//Caricamento delle funzionalità necessarie//  
#include <pcl/ModelCoefficients.h>  
#include <pcl/io/pcd_io.h>  
#include <pcl/point_types.h>  
#include <pcl/filters/extract_indices.h>  
#include <pcl/filters/passthrough.h>  
#include <pcl/features/normal_3d.h>  
#include <pcl/sample_consensus/method_types.h>  
#include <pcl/sample_consensus/model_types.h>  
#include <pcl/segmentation/sac_segmentation.h>  
-----  
//Dichiarazione degli oggetti necessari//  
typedef pcl::PointXYZ PointT;  
int main (int argc, char** argv)  
{  
    pcl::PCDReader reader;  
    pcl::PassThrough<PointT> pass;  
    pcl::NormalEstimation<PointT, pcl::Normal> ne;  
    pcl::SACSegmentationFromNormals<PointT, pcl::Normal> seg;  
    pcl::search::KdTree<PointT>::Ptr tree (new pcl::search::KdTree<PointT> ());  
    pcl::ExtractIndices<PointT> extract;  
    pcl::ExtractIndices<pcl::Normal> extract_normals;  
    pcl::PCDWriter writer;  
-----  
//Dichiarazione delle variabili necessarie//
```

```

pcl::PointCloud<PointT>::Ptr cloud (new pcl::PointCloud<PointT>);
pcl::PointCloud<PointT>::Ptr cloud_filtered (new pcl::PointCloud<PointT>);
pcl::PointCloud<pcl::Normal>::Ptr cloud_normals (new pcl::PointCloud<pcl::Normal>);
pcl::PointCloud<PointT>::Ptr cloud_filtered2 (new pcl::PointCloud<PointT>);
pcl::PointCloud<pcl::Normal>::Ptr cloud_normals2 (new pcl::PointCloud<pcl::Normal>);
pcl::ModelCoefficients::Ptr coefficients_plane (new pcl::ModelCoefficients), coefficients_cylinder
(new pcl::ModelCoefficients);
pcl::PointIndices::Ptr inliers_plane (new pcl::PointIndices), inliers_cylinder (new pcl::PointIndices);
pcl::PointCloud<PointT>::Ptr cloud_cylinder (new pcl::PointCloud<PointT> ());
pcl::PointCloud<PointT>::Ptr cloud_plane (new pcl::PointCloud<PointT> ());
-----
//Caricamento della nuvola di punti//
reader.read ("tubocompletodef.pcd", *cloud);
std::cerr << "PointCloud has: " << cloud->points.size () << " data points." << std::endl;
-----
//Determinazione delle normali ai singoli punti//
ne.setSearchMethod (tree);
ne.setInputCloud (cloud);
ne.setKSearch (50);
ne.compute (*cloud_normals);
-----
//Settaggio dei parametri per creare il modello planare da ricercare all'interno della nuvola di punti//
seg.setOptimizeCoefficients (true);
seg.setModelType (pcl::SACMODEL_NORMAL_PLANE);
seg.setNormalDistanceWeight (0.1);
seg.setMethodType (pcl::SAC_RANSAC);
seg.setMaxIterations (100);
seg.setDistanceThreshold (0.03);
seg.setInputCloud (cloud);
seg.setInputNormals (cloud_normals);
-----
//Ricerca dei punti del piano all'interno della nuvola//
seg.segment (*inliers_plane, *coefficients_plane);
std::cerr << "Plane coefficients: " << *coefficients_plane << std::endl;
-----
//Estrazione dei punti del modello planare dalla nuvola di punti//
extract.setInputCloud (cloud);

```

```

extract.setIndices (inliers_plane);
extract.setNegative (false);
-----
//Memorizzazione dei piani presenti nella nuvola di punti in un file .pcd//
extract.filter (*cloud_plane);
std::cerr << "PointCloud representing the planar component: " << cloud_plane->points.size () << "
data points." << std::endl;
writer.write ("tubocompletodef_plane.pcd", *cloud_plane, false);
-----
// Eliminazione dei punti appartenenti ai piani della nuvola di punti//
extract.setNegative (true);
extract.filter (*cloud_filtered2);
extract_normals.setNegative (true);
extract_normals.setInputCloud (cloud_normals);
extract_normals.setIndices (inliers_plane);
extract_normals.filter (*cloud_normals2);
-----
//Settaggio dei parametri per creare il modello cilindrico da ricercare all'interno della nuvola di punti//
seg.setOptimizeCoefficients (true);
seg.setModelType (pcl::SACMODEL_CYLINDER);
seg.setMethodType (pcl::SAC_RANSAC);
seg.setNormalDistanceWeight (0.1);
seg.setMaxIterations (10000);
seg.setDistanceThreshold (0.05);
seg.setRadiusLimits (0, 0.1);
seg.setInputCloud (cloud_filtered2);
seg.setInputNormals (cloud_normals2);
-----
//Estrazione dei punti del modello cilindrico dalla nuvola di punti//
seg.segment (*inliers_cylinder, *coefficients_cylinder);
std::cerr << "Cylinder coefficients: " << *coefficients_cylinder << std::endl;
-----
//Memorizzazione dei cilindri presenti nella nuvola di punti in un file .pcd//
extract.setInputCloud (cloud_filtered2);
extract.setIndices (inliers_cylinder);
extract.setNegative (false);
extract.filter (*cloud_cylinder);

```

```

if (cloud_cylinder->points.empty ())
    std::cerr << "Can't find the cylindrical component." << std::endl;
else
{
    std::cerr << "PointCloud representing the cylindrical component: " << cloud_cylinder-
>points.size () << " data points." << std::endl;
    writer.write ("tubo_cylinder.pcd", *cloud_cylinder, false);
}
system("pause");
return (0);
}

```

---

COMMENTO: Il codice riportato viene utilizzato per trovare la parte cilindrica nella nuvola di punti caricata e viene esportata e salvata in un file di estensione pcd. Ogni parte del codice ha uno specifico compito:

- Nella prima parte del codice vengono caricate le funzionalità necessarie presenti all'interno delle librerie di C++, e vengono dichiarate le variabili.
- Nella seconda parte si definiscono i parametri che identificano i piani presenti nella nuvola. I valori di input sono 3: Un'indice che caratterizza l'influenza della superficie normale nella costruzione del modello cilindrico, la distanza limite tra la superficie cilindrica generata dal codice e quella interpolata sulla nuvola di punti, e il numero massimo di iterazioni (se maggiore le tempistiche di elaborazione dati sono più alte).
  - Nella terza parte dove sono presenti le sezioni si estraggono i punti presenti nel modello planare generato e si esportano in un file pcd
- Nella quarta parte dove sono presenti le sezioni si definiscono i parametri che identificano i cilindri presenti nella nuvola. Sono gli stessi definiti per i piani, ma in più si aggiunge il parametro relativo al limite del raggio definito da un intervallo (minimo e massimo).
- Nella quinta e ultima parte dove è presente la sezione viene verificato se nella nuvola è presente una superficie cilindrica e in caso affermativo, viene memorizzata in un file pcd.

## All.to n .4 Output codice PCL tubo portaoggetti

```
PointCloud has: 1635695 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999079
  values[1]: -0.042751
  values[2]: -0.00378535
  values[3]: 0.315785

PointCloud representing the planar component: 311107 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -0.0142141
  values[1]: -0.985208
  values[2]: -0.0178806
  values[3]: 0.999298
  values[4]: -0.0350981
  values[5]: -0.0131133
  values[6]: 0.0405394

PointCloud representing the cylindrical component: 1096318 data points.
Premere un tasto per continuare.....
```

Fig 1 - Output dell' algoritmo PCL Modello 3D a 360° senza sottocampionamento

```
PointCloud has: 199005 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999407
  values[1]: -0.0342819
  values[2]: -0.00313502
  values[3]: 0.324274

PointCloud representing the planar component: 55470 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.616342
  values[1]: -1.00663
  values[2]: -0.0258794
  values[3]: 0.999347
  values[4]: -0.0337644
  values[5]: -0.012848
  values[6]: 0.0409546

PointCloud representing the cylindrical component: 139374 data points.
Premere un tasto per continuare.....
```

Fig 2 - Output dell' algoritmo PCL Modello 3D a 360° con sottocampionamento di 1 mm

```
PointCloud has: 13510 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999401
  values[1]: -0.0344537
  values[2]: -0.0031231
  values[3]: 0.324124

PointCloud representing the planar component: 4269 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 1.10578
  values[1]: -1.02303
  values[2]: -0.0309961
  values[3]: 0.999369
  values[4]: -0.0334054
  values[5]: -0.0120641
  values[6]: 0.041326

PointCloud representing the cylindrical component: 9127 data points.
Premere un tasto per continuare.....
```

Fig. 3 - Output dell' algoritmo PCL Modello 3D a 360° con sottocampionamento di 4 mm

```
PointCloud has: 1355947 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999073
  values[1]: -0.0428727
  values[2]: -0.00380989
  values[3]: 0.315665

PointCloud representing the planar component: 308528 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 4.83616
  values[1]: -1.13711
  values[2]: -0.0761092
  values[3]: -0.999435
  values[4]: 0.0313517
  values[5]: 0.0121124
  values[6]: 0.0410197

PointCloud representing the cylindrical component: 847138 data points.
Premere un tasto per continuare.....
```

Fig. 4 - Output dell' algoritmo PCL Modello 3D a 270° senza sottocampionamento

```

PointCloud has: 174774 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.99941
  values[1]: -0.0341975
  values[2]: -0.00315367
  values[3]: 0.324365

PointCloud representing the planar component: 54987 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -0.0185085
  values[1]: -0.985213
  values[2]: -0.0169193
  values[3]: -0.999297
  values[4]: -0.0338853
  values[5]: -0.0160106
  values[6]: 0.040594

PointCloud representing the cylindrical component: 115940 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

Fig. 5 - Output dell'algorithmo PCL Modello 3D a 270° con sottocampionamento di 1 mm

```

PointCloud has: 11785 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999402
  values[1]: -0.0344388
  values[2]: -0.00313356
  values[3]: 0.324142

PointCloud representing the planar component: 4247 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -3.047
  values[1]: -0.882457
  values[2]: 0.0282361
  values[3]: -0.999315
  values[4]: 0.0339608
  values[5]: 0.0147318
  values[6]: 0.040852

PointCloud representing the cylindrical component: 7419 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

Fig. 6 - Output dell'algorithmo PCL Modello 3D a 270° con sottocampionamento di 4 mm

```

PointCloud has: 963332 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999052
  values[1]: -0.0433653
  values[2]: -0.00385331
  values[3]: 0.315174

PointCloud representing the planar component: 306602 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -0.0123911
  values[1]: -0.986341
  values[2]: -0.0179544
  values[3]: 0.999243
  values[4]: -0.0347314
  values[5]: -0.0174984
  values[6]: 0.0412158

PointCloud representing the cylindrical component: 537170 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

Fig. 7 - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 180° senza sottocampionamento

```

PointCloud has: 129154 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999411
  values[1]: -0.0341774
  values[2]: -0.00317377
  values[3]: 0.324391

PointCloud representing the planar component: 54595 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -0.209242
  values[1]: -0.97983
  values[2]: -0.0142276
  values[3]: -0.999271
  values[4]: 0.0339998
  values[5]: 0.0173525
  values[6]: 0.0413318

PointCloud representing the cylindrical component: 71194 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

Fig. 8 - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 180° con sottocampionamento di 1 mm

```
PointCloud has: 9028 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999402
  values[1]: -0.0344317
  values[2]: -0.0031194
  values[3]: 0.324146

PointCloud representing the planar component: 4249 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.0669369
  values[1]: -0.989309
  values[2]: -0.0180786
  values[3]: -0.999334
  values[4]: 0.0327197
  values[5]: 0.0161369
  values[6]: 0.0412183

PointCloud representing the cylindrical component: 4697 data points.
Premere un tasto per continuare.....
```

Fig. 9 - Output dell' algoritmo PCL Modello 3D a 180° con sottocampionamento di 4 mm

```
PointCloud has: 704634 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999031
  values[1]: -0.0438446
  values[2]: -0.00388755
  values[3]: 0.314697

PointCloud representing the planar component: 305809 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.126059
  values[1]: -0.989504
  values[2]: -0.0150918
  values[3]: 0.999224
  values[4]: -0.0360299
  values[5]: -0.0159288
  values[6]: 0.0364447

PointCloud representing the cylindrical component: 328151 data points.
Premere un tasto per continuare.....
```

Fig. 10 - Output dell' algoritmo PCL Modello 3D a 90° senza sottocampionamento

```

PointCloud has: 98758 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999411
  values[1]: -0.0341673
  values[2]: -0.00317219
  values[3]: 0.324404

PointCloud representing the planar component: 54466 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.726524
  values[1]: -1.01133
  values[2]: -0.0252118
  values[3]: -0.999186
  values[4]: 0.0361361
  values[5]: 0.0179034
  values[6]: 0.0361326

PointCloud representing the cylindrical component: 42585 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

Fig. 11 - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 90° con sottocampionamento di 1 mm

```

PointCloud has: 7063 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999402
  values[1]: -0.0344328
  values[2]: -0.00311991
  values[3]: 0.324145

PointCloud representing the planar component: 4259 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -2.2506
  values[1]: -0.909664
  values[2]: 0.0234779
  values[3]: -0.999319
  values[4]: 0.0335807
  values[5]: 0.0152987
  values[6]: 0.0356444

PointCloud representing the cylindrical component: 2697 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

Fig. 12 - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 90° con sottocampionamento di 4 mm

```

PointCloud has: 546836 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.99901
  values[1]: -0.0443146
  values[2]: -0.00392161
  values[3]: 0.314226

PointCloud representing the planar component: 304899 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: -0.796568
  values[1]: -0.955445
  values[2]: 0.00955379
  values[3]: 0.999303
  values[4]: -0.03309
  values[5]: -0.0172767
  values[6]: 0.0278038

PointCloud representing the cylindrical component: 195210 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

**Fig. 13** - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 45° senza sottocampionamento

```

PointCloud has: 85014 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999411
  values[1]: -0.0341569
  values[2]: -0.00316971
  values[3]: 0.324416

PointCloud representing the planar component: 54287 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.144798
  values[1]: -0.985645
  values[2]: -0.00317985
  values[3]: 0.999331
  values[4]: -0.0325053
  values[5]: -0.0167854
  values[6]: 0.024477

PointCloud representing the cylindrical component: 29092 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

**Fig. 14** - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 45° con sottocampionamento di 1 mm

```

PointCloud has: 6084 data points.
Plane coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 0.999402
  values[1]: -0.0344459
  values[2]: -0.00312109
  values[3]: 0.324131

PointCloud representing the planar component: 4252 data points.
Cylinder coefficients: header:
seq: 0 stamp: 0 frame_id:
values[]
  values[0]: 2.59287
  values[1]: -1.06744
  values[2]: -0.0350214
  values[3]: 0.999311
  values[4]: -0.0341088
  values[5]: -0.0146106
  values[6]: 0.0216183

PointCloud representing the cylindrical component: 1361 data points.
Premere un tasto per continuare.....

```

**Fig. 15** - Output dell'algoritmo PCL Modello 3D a 45° con sottocampionamento di 4 mm

COMMENTO: I primi 4 valori da values[0] a values [3] non sono di nostro interesse in quanto rappresentativi del piano presente all'interno della nuvola di punti. Nella seconda serie di valori da values[0] a values [5] sono le coordinate x,y,z dei centri delle circonferenze di base del cilindro, mentre il values[6] rappresenta il raggio medio calcolato considerando tutti i punti della nuvola.

## All.to n .5 Tabelle coordinate centro sezioni tubo porta-progetti

N°sez.	Tubo Riferimento PVC Scansione:360°				Tubo Riferimento PVC Scansione:270°			
	N.punti : 1.635.695 punti				N.punti : 1.355.947 punti			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]
1	-97,66	-1,49	-97,57	-1,47	-97,66	-1,49	-97,56	-1,43
2	-97,82	-1,52	-97,80	-1,49	-97,81	-1,48	-97,76	-1,53
3	-98,04	-1,61	-98,06	-1,48	-98,03	-1,55	-97,98	-1,52
4	-98,3	-1,7	-98,29	-1,68	-98,29	-1,66	-98,26	-1,66
5	-98,62	-1,79	-98,61	-1,75	-98,63	-1,79	-98,58	-1,75
6	-98,83	-1,89	-98,82	-1,77	-98,82	-1,85	-98,79	-1,83
7	-99,10	-2	-99,1	-1,92	-99,09	-1,94	-99,11	-2
8	-99,38	-2,12	-99,42	-2,04	-99,37	-2,07	-99,38	-2,10
9	-99,68	-2,24	-99,71	-2,2	-99,69	-2,24	-99,7	-2,25
	N.punti : 199.005 punti				N.punti : 174.774 punti			
1	-97,61	-1,44	-97,53	-1,43	-97,60	-1,39	-97,49	-1,36
2	-97,75	-1,46	-97,81	-1,47	-97,75	-1,36	-97,77	-1,42
3	-98,00	-1,54	-98,03	-1,49	-98,00	-1,45	-97,95	-1,51
4	-98,26	-1,64	-98,3	-1,65	-98,25	-1,57	-98,27	-1,63
5	-98,60	-1,75	-98,58	-1,78	-98,61	-1,72	-98,57	-1,77
6	-98,83	-1,85	-98,81	-1,86	-98,83	-1,78	-98,83	-1,84
7	-99,12	-1,94	-99,16	-1,93	-99,12	-1,86	-99,03	-1,84
8	-99,37	-2,08	-99,4	-2,09	-99,37	-2,00	-99,36	-2,10
9	-99,68	-2,20	-99,68	-2,19	-99,68	-2,19	-99,63	-2,21
	N.punti : 13.510 punti				N.punti : 11.785 punti			
1	-97,61	-1,40	-97,48	-1,44	-97,60	-1,33	-97,46	-1,38
2	-97,76	-1,47	-97,8	-1,47	-97,76	-1,32	-97,73	-1,38
3	-97,99	-1,53	-97,99	-1,56	-97,98	-1,43	-97,94	-1,43
4	-98,25	-1,59	-98,20	-1,68	-98,24	-1,50	-98,26	-1,62
5	-98,61	-1,73	-98,6	-1,77	-98,62	-1,71	-98,57	-1,68
6	-98,85	-1,83	-98,81	-1,84	-98,85	-1,76	-98,78	-1,85
7	-99,14	-1,92	-99,06	-1,98	-99,14	-1,83	-99	-1,86
8	-99,37	-2,04	-99,31	-2	-99,37	-1,95	-99,25	-1,86
9	-99,68	-2,15	-99,62	-2,16	-99,68	-2,14	-99,59	-2,12

N°sez.	Tubo Riferimento PVC Scansione:180°				Tubo Riferimento PVC Scansione:90°			
	N.punti : 963.332 punti				N.punti : 704.634 punti			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]
1	-97,78	-1,61	-97,65	-1,51	-97,86	-1,57	-97,64	-1,37
2	-97,97	-1,62	-97,91	-1,60	-97,97	-1,30	-97,93	-1,45
3	-98,20	-1,69	-98,14	-1,72	-98,21	-1,40	-98,13	-1,44
4	-98,41	-1,76	-98,32	-1,72	-98,44	-1,57	-98,34	-1,61
5	-98,69	-1,85	-98,66	-1,77	-98,72	-1,85	-98,64	-1,76
6	-98,91	-1,95	-98,85	-1,93	-98,75	-1,46	-98,71	-1,55
7	-99,21	-2,08	-99,20	-2,24	-98,92	-1,29	-98,87	-1,43
8	-99,46	-2,12	-99,47	-2,18	-99,33	-1,64	-99,28	-1,71
9	-99,75	-2,26	-99,71	-2,21	-99,91	-2,42	-99,87	-2,43
	N.punti : 129.154 punti				N.punti : 98.758 punti			
1	-97,76	-1,54	-97,63	-1,53	-97,88	-1,57	-97,75	-1,60
2	-97,92	-1,51	-97,88	-1,59	-97,89	-1,14	-97,81	-1,19
3	-98,16	-1,59	-98,18	-1,72	-98,11	-1,18	-98,03	-1,19
4	-98,37	-1,64	-98,33	-1,75	-98,34	-1,33	-98,30	-1,36
5	-98,71	-1,83	-98,69	-1,78	-98,68	-1,75	-98,66	-1,82
6	-98,92	-1,91	-98,91	-2	-98,73	-1,37	-98,73	-1,36
7	-99,22	-2,01	-99,23	-2,19	-98,99	-1,35	-98,94	-1,36
8	-99,44	-1,98	-99,41	-1,99	-99,30	-1,54	-99,25	-1,51
9	-99,72	-2,14	-99,72	-2,18	-99,82	-2,16	-99,78	-2,24
	N.punti : 9.028 punti				N.punti : 7.063 punti			
1	-97,77	-1,52	-97,59	-1,43	-98,02	-1,75	-97,97	-1,75
2	-97,98	-1,56	-97,72	-1,41	-97,90	-1,19	-97,85	-1,16
3	-98,13	-1,53	-97,98	-1,67	-98,03	-1,06	-98,11	-1,12
4	-98,36	-1,54	-98,31	-1,73	-98,21	-1,06	-98,38	-1,09
5	-98,72	-1,82	-98,67	-1,88	-98,66	-1,71	-98,65	-1,84
6	-98,95	-1,92	-98,89	-2,01	-98,75	-1,38	-98,64	-1,44
7	-99,22	-1,94	-99,06	-1,86	-99,10	-1,48	-99,15	-1,59
8	-99,41	-1,89	-99,45	-1,98	-99,27	-1,41	-99,11	-1,56
9	-99,69	-2,02	-99,67	-2,30	-99,66	-1,76	-99,87	-1,89

Tubo Riferimento PVC Scansione:45°				
N.punti : 546.836 punti				
N°sez.	Pratt		3DReshaper	
	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]
1	-98,00	-1,62	-97,89	-1,63
2	-97,92	-0,89	-97,83	-1,03
3	-98,27	-1,08	-98,16	-1,16
4	-98,36	-1,07	-98,31	-1,16
5	-98,73	-1,73	-98,69	-1,75
6	-98,55	-0,84	-98,57	-0,96
7	-98,75	-0,74	-98,67	-0,73
8	-99,21	-1,18	-99,24	-1,42
9	-100,06	-2,60	-99,98	-2,53
N.punti : 85.014 punti				
1	-98,10	-1,79	-98,04	-1,65
2	-97,80	-0,68	-97,67	-0,68
3	-98,04	-0,69	-97,89	-0,73
4	-98,13	-0,65	-98,03	-0,72
5	-98,83	-1,85	-98,78	-1,82
6	-98,47	-0,68	-98,45	-0,65
7	-98,69	-0,62	-98,61	-0,62
8	-99,08	-0,94	-99,06	-0,97
9	-99,17	-0,63	-99,40	-1,18
N.punti : 6.084 punti				
1	-98,22	-2,00	-49,82	-2,07
2	-98,08	-1,11	-98,02	-1,16
3	-97,83	-0,12	-97,99	-0,11
4	-97,74	0,12	-97,91	-0,03
5	-98,72	-1,59	-101,17	-13,29
6	-98,42	-0,56	-98,46	-0,69
7	-98,51	-0,24	-98,20	-1,26
8	-98,53	0,22	-97,60	-1,28
9	-99,54	-1,18	-99,68	-1,38

## All.to n .6 Codice Matlab tubazioni corridoio primo piano (rimozione piani)

**INPUT:** Nuvola di punti in formato .ply completa

**OUTPUT:** Nuvola di punti in formato .pcd senza le pareti, il pavimento e il soffitto

-----  
//Caricamento nuvola di punti//

ptCloud=pcread('tubazioni - Cloud.ply');

-----  
//Settaggio parametri modello planare//

maxDistance=80;

referenceVector=[0,0,1];

maxAngularDistance=10;

-----  
//Individuazione della zona all'interno della nuvola di punti dove ricercare il piano//

roi = [-inf,inf;-inf,inf;-inf,1400];

sampleIndices = findPointsInROI(ptCloud,roi);

-----  
//Funzione che cerca il piano all'interno della nuvola di punti//

```
[model1,inlierIndices,outlierIndices]=  
pcfitplane(ptCloud,maxDistance,referenceVector,maxAngularDistance,'SampleIndices',sampleIndices  
);
```

```
-----  
//Rimozione piano dalla nuvola di punti di partenza//
```

```
restainCloud = select(ptCloud,outlierIndices);
```

```
-----  
//Settaggio parametri modello planare//
```

```
referenceVector2=[0,1,0];
```

```
-----  
//Individuazione della zona all'interno della nuvola di punti dove ricercare il piano//
```

```
roi2 = [-inf,inf;-inf,1015;-inf,inf];
```

```
sampleIndices2 = findPointsInROI(restainCloud,roi2);
```

```
-----  
//Funzione che cerca il piano all'interno della nuvola di punti//
```

```
[model2,inlierIndices2,outlierIndices2]=
```

```
pcfitplane(restainCloud,maxDistance,referenceVector2,maxAngularDistance,'SampleIndices',sampleI  
ndices2);
```

```
-----  
//Rimozione piano dalla nuvola di punti//
```

```
restainCloud2=select(restainCloud,outlierIndices2);
```

```
-----  
//Settaggio parametri modello planare//
```

```
referenceVector3=[1,0,0];
```

```
-----  
//Individuazione della zona all'interno della nuvola di punti dove ricercare il piano//
```

```
roi3=[-inf,500;1495,inf;-inf,2100];
```

```
sampleIndices3 = findPointsInROI(restainCloud2,roi3);
```

```
-----  
//Funzione che cerca il piano all'interno della nuvola di punti//
```

```
[model3,inlierIndices3,outlierIndices3]=
```

```
pcfitplane(restainCloud2,maxDistance,referenceVector3,maxAngularDistance,'SampleIndices',sample  
Indices3);
```

```
-----  
//Rimozione piano dalla nuvola di punti//
```

```
restainCloud3=select(restainCloud2,outlierIndices3);
```

```

//Individuazione della zona all'interno della nuvola di punti dove ricercare il piano//
roi4=[500,700;1450,1500;-inf,inf];
sampleIndices4 = findPointsInROI(restainCloud3,roi4);
-----
//Funzione che cerca il piano all'interno della nuvola di punti//
[model4,inlierIndices4,outlierIndices4]=
pcfitplane(restainCloud3,maxDistance,referenceVector2,maxAngularDistance,'SampleIndices',sample
Indices4);
-----
//Rimozione piano dalla nuvola di punti//
restainCloud4=select(restainCloud3,outlierIndices4);
-----
//Individuazione della zona all'interno della nuvola di punti dove ricercare il piano//
roi5=[-inf,750;1000,1400;-inf,inf];
sampleIndices5 = findPointsInROI(restainCloud4,roi5);
-----
//Funzione che cerca il piano all'interno della nuvola di punti//
[model5,inlierIndices5,outlierIndices5]=
pcfitplane(restainCloud4,maxDistance,referenceVector3,maxAngularDistance,'SampleIndices',sample
Indices5);
-----
//Rimozione piano dalla nuvola di punti//
restainCloud5=select(restainCloud4,outlierIndices5);
-----
//Individuazione della zona all'interno della nuvola di punti dove ricercare il piano//
roi6=[-inf,inf;-inf,inf;4000,inf];
sampleIndices6 = findPointsInROI(restainCloud5,roi6);
-----
//Funzione che cerca il piano all'interno della nuvola di punti//
[model6,inlierIndices6,outlierIndices6]=
pcfitplane(restainCloud5,maxDistance,referenceVector,maxAngularDistance,'SampleIndices',sampleI
ndices6);
-----
//Rimozione piano dalla nuvola di punti//
restainCloud6=select(restainCloud5,outlierIndices6);
-----
//Memorizzazione della nuvola di punti in un file di formato

```

```
pcwrite(restainCloud6,tubazionimod);
```

COMMENTO: Si procede caricando la nuvola completa in formato ply. Nei parametri per creare la superficie planare si evidenzia che si è dovuto specificare la direzione principale di estensione della tubazione (in questo caso lungo la direzione z) nel ReferenceVector, la zona in cui ricade la parete da sottrarre nella matrice roi utilizzando il sistema di riferimento cartesiano generato da Matlab, la massima distanza del piano interpolante la parete dal generico punto della nuvola (espressa in mm in questo caso) memorizzata nella variabile maxDistance, e per piani che possono essere inclinati, si specifica l'angolo massimo in radianti memorizzato nella variabile maxAngularDistance. L'operazione è stata eseguita per tutte le pareti, il pavimento e il soffitto per un totale di 6 superfici modificando il ReferenceVector e il roi. Infine la nuvola elaborata è stata salvata in un file esterno per poter proseguire con il trattamento dei dati.

## **All.to n .7 Codice Matlab tubazioni primo piano (superficie cilindrica)**

**INPUT: Nuvola di punti in formato .ply senza le pareti, il pavimento e il soffitto**

**OUTPUT: Rappresentazione superficie cilindrica**

```
-----  
//Caricamento della nuvola di punti//  
ptCloud=pcread('restainCloud6.ply');  
-----  
//Settaggio parametri cilindro//  
maxDistance = 5;  
referenceVector=[0,0,1];  
-----  
//Individuazione zona per ricerca cilindro//  
roi = [900,1100;1100,1400;-inf,inf];  
sampleIndices=findPointsInROI(ptCloud,roi);  
-----  
//Creazione superficie cilindrica//  
model = pcfitcylinder(ptCloud,maxDistance,referenceVector,'SampleIndices',sampleIndices);  
-----  
//Rappresentazione superficie cilindrica//  
plot(model);  
hold on;  
pcshow(ptCloud);
```

COMMENTO: Si procede caricando la nuvola completa in formato ply. Nei parametri per creare la superficie cilindrica si evidenzia che si è dovuto specificare la direzione principale di estensione della

tubazione (in questo caso lungo la direzione z) nel ReferenceVector, la zona in cui ricade la parete da sottrarre nella matrice roi utilizzando il sistema di riferimento cartesiano generato da Matlab e la massima distanza del piano interpolante la parete dal generico punto della nuvola (espressa in mm in questo caso) memorizzata nella variabile maxDistance. Viene visualizzata la superficie cilindrica insieme alla nuvola di punti caricata.

## **All.to n .8 Codice Matlab tubazioni primo piano (sezioni tubazioni)**

**INPUT: Nuvola di punti in formato .ply senza le pareti, il pavimento e il soffitto**

**OUTPUT: Vettore Par: Parametri geometrici del tubo (raggio e coordinate centro delle sezioni)**

```

-----
//Caricamento nuvola di punti//
ptCloud=pcread('tubazionimod.ply');
-----
//Coordinate Zmin e Zmax del piano di sezione con spessore pari a 1 cm//
Zmin1=2300; %SEZ 1
Zmax1=2310; %SEZ 1
Zmin2=2600; %SEZ 2
Zmax2=2610; %SEZ 2
Zmin3=2900; %SEZ 3
Zmax3=2910; %SEZ 3
Zmin4=3200; %SEZ 4
Zmax4=3210; %SEZ 4
Zmin5=3500; %SEZ 5
Zmax5=3510; %SEZ 5
Zmin6=3800; %SEZ 6
Zmax6=3810; %SEZ 6
Zmin7=4100; %SEZ 7
Zmax7=4110; %SEZ 7
-----
//Estrazione delle coordinate x,y,z della nuvola di punti nella matrice XYZ//
XYZ=ptCloud.Location;
[m,n]=size(XYZ);
XYZord=sortrows(XYZ,3);
-----
//Estrazione delle coordinate x,y dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,3)>=Zmin1 && XYZord(i,3)<=Zmax1
        for s=1:3
            XYZsez1(f,s)=XYZord(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
XY1=[XYZsez1(:,1) XYZsez1(:,2)];
scatter(XY1(:,1),XY1(:,2),1);
[o,p]=size(XY1);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//

```

```

f=1;
for i=1:o;
    if XY(i,2)<=1180
        for s=1:2
            XY1_1(f,s)=XY(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_1=CircleFitByPratt(XY1_1);
f=1;
for i=1:o;
    if XY(i,2)>=1180 && XY(i,2)<=1260 && XY(i,1)<=990
        for s=1:2
            XY2_1(f,s)=XY(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_1=CircleFitByPratt(XY2_1);
f=1;
for i=1:o;
    if XY(i,2)>=1255 && XY(i,1)>=965
        for s=1:2
            XY3_1(f,s)=XY(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_1=CircleFitByPratt(XY3_1);
-----
//Estrazione delle coordinate x,y dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,3)>=Zmin2 && XYZord(i,3)<=Zmax2
        for s=1:3
            XYZsez2(f,s)=XYZord(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
XY2=[XYZsez2(:,1) XYZsez2(:,2)];
scatter(XY2(:,1),XY2(:,2),1);
[o,p]=size(XY2);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XY2(i,2)<=1140
        for s=1:2
            XY1_2(f,s)=XY2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
end

```

```

Par1_2=CircleFitByPratt(XY1_2);
f=1;
for i=1:o;
    if XY2(i,2)>=1180 && XY2(i,2)<=1254 && XY2(i,1)<=990
        for s=1:2
            XY2_2(f,s)=XY2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_2=CircleFitByPratt(XY2_2);
f=1;
for i=1:o;
    if XY(i,2)>=1230 && XY(i,1)>=977
        for s=1:2
            XY3_2(f,s)=XY2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_2=CircleFitByPratt(XY3_2);
-----
//Estrazione delle coordinate x,y dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,3)>=Zmin3 && XYZord(i,3)<=Zmax3
        for s=1:3
            XYZsez3(f,s)=XYZord(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
XYZ3=[XYZsez3(:,1) XYZsez3(:,2)];
scatter(XY3(:,1),XY3(:,2),1);
[o,p]=size(XY3);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XY3(i,2)<=1140
        for s=1:2
            XY1_3(f,s)=XY3(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_3=CircleFitByPratt(XY1_3);
f=1;
for i=1:o;
    if XY3(i,2)>=1180 && XY3(i,2)<=1250 && XY3(i,1)<=990
        for s=1:2
            XY2_3(f,s)=XY3(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end

```

```

end
Par2_3=CircleFitByPratt(XY2_3);
f=1;
for i=1:o;
    if XY3(i,2)>=1220 && XY3(i,1)>=986
        for s=1:2
            XY3_3(f,s)=XY3(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_3=CircleFitByPratt(XY3_3);
-----
//Estrazione delle coordinate x,y dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,3)>=Zmin4 && XYZord(i,3)<=Zmax4
        for s=1:3
            XYZsez4(f,s)=XYZord(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
XY4=[XYZsez4(:,1) XYZsez4(:,2)];
scatter(XY4(:,1),XY4(:,2),1);
[o,p]=size(XY4);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XY4(i,2)<=1140
        for s=1:2
            XY1_4(f,s)=XY4(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_4=CircleFitByPratt(XY1_4);
f=1;
for i=1:o;
    if XY4(i,2)>=1220 && XY4(i,1)<=993
        for s=1:2
            XY2_4(f,s)=XY4(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_4=CircleFitByPratt(XY2_4);
f=1;
for i=1:o;
    if XY4(i,2)>=1220 && XY4(i,1)>=999
        for s=1:2
            XY3_4(f,s)=XY4(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end

```

```

        end
    end
    Par3_4=CircleFitByPratt(XY3_4);
    -----
//Estrazione delle coordinate x,y dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,3)>=Zmin5 && XYZord(i,3)<=Zmax5
        for s=1:3
            XYZsez5(f,s)=XYZord(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
XY5=[XYZsez5(:,1) XYZsez5(:,2)];
scatter(XY5(:,1),XY5(:,2),1);
[o,p]=size(XY5);
    -----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XY5(i,2)<=1130
        for s=1:2
            XY1_5(f,s)=XY5(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_5=CircleFitByPratt(XY1_5);
f=1;
for i=1:o;
    if XY5(i,2)>=1180
        for s=1:2
            XY2_5(f,s)=XY5(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_5=CircleFitByPratt(XY2_5);
f=1;
for i=1:o;
    if XY5(i,2)>=1140 && XY5(i,2)<=1175 && XY5(i,1)>=980
        for s=1:2
            XY3_5(f,s)=XY5(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_5=CircleFitByPratt(XY3_5);
    -----
//Estrazione delle coordinate x,y dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,3)>=Zmin6 && XYZord(i,3)<=Zmax6
        for s=1:3

```

```

                XYZsez6(f,s)=XYZord(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    XY6=[XYZsez6(:,1) XYZsez6(:,2)];
    scatter(XY6(:,1),XY6(:,2),1);
    [o,p]=size(XY6);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XY6(i,2)<=1130
        for s=1:2
            XY1_6(f,s)=XY6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_6=CircleFitByPratt(XY1_6);
f=1;
for i=1:o;
    if XY6(i,2)>=1180
        for s=1:2
            XY2_6(f,s)=XY6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_6=CircleFitByPratt(XY2_6);
f=1;
for i=1:o;
    if XY6(i,2)>=1140 && XY6(i,2)<=1175
        for s=1:2
            XY3_6(f,s)=XY6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_6=CircleFitByPratt(XY3_6);
-----
//Estrazione delle coordinate x,y dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
for i=1:m;
    if XYZord(i,3)>=Zmin7 && XYZord(i,3)<=Zmax7
        for s=1:3
            XYZsez7(f,s)=XYZord(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
XY7=[XYZsez7(:,1) XYZsez7(:,2)];
scatter(XY7(:,1),XY7(:,2),1);
[o,p]=size(XY7);
-----

```

```

//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XY7(i,2)<=1130
        for s=1:2
            XY1_7(f,s)=XY7(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_7=CircleFitByPratt(XY1_7);
f=1;
for i=1:o;
    if XY7(i,2)>=1180
        for s=1:2
            XY2_7(f,s)=XY7(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_7=CircleFitByPratt(XY2_7);
f=1;
for i=1:o;
    if XY7(i,2)>=1140 && XY7(i,2)<=1175
        for s=1:2
            XY3_7(f,s)=XY7(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_7=CircleFitByPratt(XY3_7);

```

COMMENTO: Il primo passaggio è caricare la nuvola di punti in formato .ply . Si è scelta la coordinata (in questo caso l'ordinata) lungo l'asse del tubo in corrispondenza del piano di sezione. Con un apposito comando si è estratta l'informazione numerica delle coordinate x,y,z nello spazio rispetto a un sistema di riferimento locale generato dal software ECHO al momento della creazione della nuvola. Dopo aver riordinato i valori della matrice delle coordinate rispetto alla coordinata z, si è creato un doppio ciclo annidato in modo da ottenere tutti i parametri necessari.

Il risultato finale viene memorizzato nella variabile vettoriale Par che deriva dalla funzione CirclefitbyPratt (All. to n.1) in cui vengono riportate le coordinate y,z del centro della sezione circolare e il raggio di ogni tubazione presente in ogni sezione.

## All.to n. 9 Report di registrazione di FARO SCENE

### Report di registrazione

Proietta	sottorerra2
Cluster	AutoCluster
Periodo di registrazione	18/11/2019, 15:06:34 - 20/11/2019, 15:03:38
Posizione	
Data del report	20/11/2019, 15:56:00

### Codificazione a colori

Errore punto	< 8 mm	> 20 mm
Sovrapposizione	> 25.0 %	< 10.0 %

### Panoramica

#### Statistiche punto di scansione

Errore punto massimo	8.0 mm
Errore punto medio	3.9 mm
Sovrapposizione minima	6.2 %

## Errori di scansione

### Statistiche punto di scansione

Cluster/Scansione	Connessioni	Iterazioni Errore punto [mm]	Errore punto medio [mm]	Min Sovrapposizione
0003	4	6.2	4.3	6.2 %
Metro000	2	4.5	3.4	61.1 %
Metro001	4	4.5	4.0	57.8 %
Metro002	6	6.2	4.0	6.2 %
Metro003	4	3.0	2.6	50.0 %
Metro004	3	3.6	3.0	42.0 %
0000	4	8.0	4.2	20.8 %
0002	5	8.0	4.6	14.0 %

## Errori in dettaglio

### Statistiche punto di scansione

Cluster/Scansione 1	Cluster/Scansione 2	Errore punto [mm]	Sovrapposizione
0003	Metro002	6.2	6.2 %
Metro000	0003	2.3	86.7 %
Metro000	Metro001	4.5	61.1 %
Metro001	0003	4.2	67.0 %
Metro001	Metro002	4.4	57.8 %
Metro003	Metro002	2.2	60.6 %
Metro003	0000	2.8	58.4 %
Metro004	Metro002	3.6	42.0 %
Metro004	Metro003	2.6	65.5 %
Metro004	0000	2.9	79.4 %
0000	Metro002	3.3	33.6 %
0002	0003	4.6	14.0 %
0002	Metro001	2.9	72.0 %
0002	Metro002	4.4	65.5 %
0002	Metro003	3.0	50.0 %
0002	0000	8.0	20.8 %

## Mancate corrispondenze dell'inclinometro

Cluster/Scansione	Scansione	Mancata corrispondenza [deg]
0002	0002	0.1136
Metro004	Metro004	0.1652
Metro003	Metro003	0.1333
Metro000	Metro000	0.2367
Metro001	Metro001	0.1429
0000	0000	0.0900
0003	0003	0.2364
Metro002	Metro002	0.3131

### All.to n. 10 Codice Matlab tubazioni corridoio

**INPUT:** Nuvola di punti in formato .ply

**OUTPUT:** Vettore Par: Parametri geometrici del tubo (raggio e coordinate centro delle sezioni)

-----  
//Caricamento nuvola di punti//

ptCloud=pcread('matlabcorridoio.ply');

-----  
//Creazione variabili x e y in coordinate metriche per sezionamento corridoio con piani spessi 1 cm//

Xmin1=-10.01; %SEZ 1 DIREZ. LUNGA

Xmax1=-10; %SEZ 1 DIREZ. LUNGA

Xmin2=-5.01; %SEZ 2 DIREZ. LUNGA

Xmax2=-5; %SEZ 2 DIREZ. LUNGA

Xmin3=0; %SEZ 3 DIREZ. LUNGA

Xmax3=0.01; %SEZ 3 DIREZ. LUNGA

Xmin4=5; %SEZ 4 DIREZ. LUNGA

Xmax4=5.01; %SEZ 4 DIREZ. LUNGA

Xmin5=10; %SEZ 5 DIREZ. LUNGA

Xmax5=10.01; %SEZ 5 DIREZ. LUNGA

Xmin6=15; %SEZ 6 DIREZ. LUNGA

```

Xmax6=15.01; %SEZ 6 DIREZ. LUNGA
Xmin7=20; %SEZ 7 DIREZ. LUNGA
Xmax7=20.01; %SEZ 7 DIREZ. LUNGA
Ymin1=2; %SEZ 1 DIREZ. CORTA
Ymax1=2.01; %SEZ 1 DIREZ. CORTA
Ymin2=0; %SEZ 2 DIREZ. CORTA
Ymax2=0.01; %SEZ 2 DIREZ. CORTA
Ymin3=-2; %SEZ 3 DIREZ. CORTA
Ymax3=-1.99; %SEZ 3 DIREZ. CORTA
Ymin4=-4; %SEZ 4 DIREZ. CORTA
Ymax4=-3.99; %SEZ 4 DIREZ. CORTA
Ymin5=-6; %SEZ 5 DIREZ. CORTA
Ymax5=-5.99; %SEZ 5 DIREZ. CORTA
Ymin6=-8; %SEZ 6 DIREZ. CORTA
Ymax6=-7.99; %SEZ 6 DIREZ. CORTA

```

---

```
//Creazione matrice coordinate x,y,z dei punti della nuvola//
```

```

XYZ=ptCloud.Location;
[m,n]=size(XYZ);
XYZordX=sortrows(XYZ,1);
XYZordY=sortrows(XYZ,2);

```

---

```
//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
```

```

k=1;
for i=1:m;
    if XYZordX(i,1)>=Xmin1 && XYZordX(i,1)<=Xmax1
        for j=1:n
            XYZsez1X(k,j)=XYZordX(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ1=[XYZsez1X(:,2) XYZsez1X(:,3)];
[o,p]=size(YZ1);

```

---

```
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
```

```
f=1;
```

```

for i=1:o;
    if YZ1(i,1)>=0.65 && YZ1(i,1)<=0.75 && YZ1(i,2)>=1 && YZ1(i,2)<=1.06
        for s=1:2
            YZ1_1(f,s)=YZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_1X = CircleFitByPratt(YZ1_1);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ1(i,1)>=0.75 && YZ1(i,1)<=1 && YZ1(i,2)>=1 && YZ1(i,2)<=1.05
        for s=1:2
            YZ1_2(f,s)=YZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par1_2X = CircleFitByPratt(YZ1_2);
-----
//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordX(i,1)>=Xmin2 && XYZordX(i,1)<=Xmax2
        for j=1:n
            XYZsez2X(k,j)=XYZordX(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ2=[XYZsez2X(:,2) XYZsez2X(:,3)];
[o,p]=size(YZ2);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if YZ2(i,1)>=1.8 && YZ2(i,1)<=2 && YZ2(i,2)>=0.98 && YZ2(i,2)<=1.1

```

```

        for s=1:2
            YZ2_1(f,s)=YZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_1X = CircleFitByPratt(YZ2_1);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ2(i,1)>=2 && YZ2(i,1)<=2.2 && YZ2(i,2)>=0.98 && YZ2(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ2_2(f,s)=YZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_2X = CircleFitByPratt(YZ2_2);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ2(i,1)>=2.2 && YZ2(i,1)<=2.38 && YZ2(i,2)>=0.98 && YZ2(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ2_3(f,s)=YZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_3X = CircleFitByPratt(YZ2_3);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ2(i,1)>=2.38 && YZ2(i,1)<=2.5 && YZ2(i,2)>=0.98 && YZ2(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ2_4(f,s)=YZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_4X = CircleFitByPratt(YZ2_4);

```

---

```
//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
```

```
k=1;
```

```
for i=1:m;
```

```
    if XYZordX(i,1)>=Xmin3 && XYZordX(i,1)<=Xmax3
```

```
        for j=1:n
```

```
            XYZsez3X(k,j)=XYZordX(i,j);
```

```
        end
```

```
        k=k+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
YZ3=[XYZsez3X(:,2) XYZsez3X(:,3)];
```

```
[o,p]=size(YZ3);
```

---

```
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
```

```
f=1;
```

```
for i=1:o;
```

```
    if YZ3(i,1)>=1.8 && YZ3(i,1)<=2 && YZ3(i,2)>=0.98 && YZ3(i,2)<=1.1
```

```
        for s=1:2
```

```
            YZ3_1(f,s)=YZ3(i,s);
```

```
        end
```

```
        f=f+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
Par3_1X = CircleFitByPratt(YZ3_1);
```

```
f=1;
```

```
for i=1:o;
```

```
    if YZ3(i,1)>=2 && YZ3(i,1)<=2.2 && YZ3(i,2)>=0.98 && YZ3(i,2)<=1.1
```

```
        for s=1:2
```

```
            YZ3_2(f,s)=YZ3(i,s);
```

```
        end
```

```
        f=f+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
Par3_2X = CircleFitByPratt(YZ3_2);
```

```
f=1;
```

```
for i=1:o;
```

```

if YZ3(i,1)>=2.2 && YZ3(i,1)<=2.35 && YZ3(i,2)>=0.98 && YZ3(i,2)<=1.1
    for s=1:2
        YZ3_3(f,s)=YZ3(i,s);
    end
    f=f+1;
end
end
Par3_3X = CircleFitByPratt(YZ3_3);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ3(i,1)>=2.35 && YZ3(i,1)<=2.5 && YZ3(i,2)>=0.98 && YZ3(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ3_4(f,s)=YZ3(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
end
Par3_4X = CircleFitByPratt(YZ3_4);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ3(i,1)>=2.6 && YZ3(i,1)<=2.7 && YZ3(i,2)>=0.98 && YZ3(i,2)<=1.05
        for s=1:2
            YZ3_5(f,s)=YZ3(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
end
Par3_5X = CircleFitByPratt(YZ3_5);
-----
//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordX(i,1)>=Xmin4 && XYZordX(i,1)<=Xmax4
        for j=1:n
            XYZsez4X(k,j)=XYZordX(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end

```

```

        end
    end
    YZ4=[XYZsez4X(:,2) XYZsez4X(:,3)];
    [o,p]=size(YZ4);
    -----
    //Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
    f=1;
    for i=1:o;
        if YZ4(i,1)>=1.7 && YZ4(i,1)<=1.9 && YZ4(i,2)>=0.98 && YZ4(i,2)<=1.1
            for s=1:2
                YZ4_1(f,s)=YZ4(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par4_1X = CircleFitByPratt(YZ4_1);
    f=1;
    for i=1:o;
        if YZ4(i,1)>=1.9 && YZ4(i,1)<=2.15 && YZ4(i,2)>=0.98 && YZ4(i,2)<=1.1
            for s=1:2
                YZ4_2(f,s)=YZ4(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par4_2X = CircleFitByPratt(YZ4_2);
    f=1;
    for i=1:o;
        if YZ4(i,1)>=2.15 && YZ4(i,1)<=2.25 && YZ4(i,2)>=0.98 && YZ4(i,2)<=1.1
            for s=1:2
                YZ4_3(f,s)=YZ4(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par4_3X = CircleFitByPratt(YZ4_3);
    -----

```

```

//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordX(i,1)>=Xmin5 && XYZordX(i,1)<=Xmax5
        for j=1:n
            XYZsez5X(k,j)=XYZordX(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ5=[XYZsez5X(:,2) XYZsez5X(:,3)];
[o,p]=size(YZ5);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if YZ5(i,1)>=1.75 && YZ5(i,1)<=1.95 && YZ5(i,2)>=0.95 && YZ5(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ5_1(f,s)=YZ5(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par5_1X = CircleFitByPratt(YZ5_1);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ5(i,1)>=1.95 && YZ5(i,1)<=2.15 && YZ5(i,2)>=0.94 && YZ5(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ5_2(f,s)=YZ5(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par5_2X = CircleFitByPratt(YZ5_2);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ5(i,1)>=2.15 && YZ5(i,1)<=2.25 && YZ5(i,2)>=1.04 && YZ5(i,2)<=1.1

```

```

        for s=1:2
            YZ5_3(f,s)=YZ5(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par5_3X = CircleFitByPratt(YZ5_3);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ5(i,1)>=2.25 && YZ5(i,1)<=2.35 && YZ5(i,2)>=1.04 && YZ5(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ5_4(f,s)=YZ5(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par5_4X = CircleFitByPratt(YZ5_4);
-----
//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordX(i,1)>=Xmin6 && XYZordX(i,1)<=Xmax6
        for j=1:n
            XYZsez6X(k,j)=XYZordX(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ6=[XYZsez6X(:,2) XYZsez6X(:,3)];
[o,p]=size(YZ6);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if YZ6(i,1)>=1.74 && YZ6(i,1)<=1.9 && YZ6(i,2)>=0.94 && YZ6(i,2)<=1.05
        for s=1:2
            YZ6_1(f,s)=YZ6(i,s);

```

```

        end
        f=f+1;
    end
end
Par6_1X = CircleFitByPratt(YZ6_1);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ6(i,1)>=1.9 && YZ6(i,1)<=2.1 && YZ6(i,2)>=0.94 && YZ6(i,2)<=1.05
        for s=1:2
            YZ6_2(f,s)=YZ6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par6_2X = CircleFitByPratt(YZ6_2);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ6(i,1)>=2.1 && YZ6(i,1)<=2.25 && YZ6(i,2)>=1.02 && YZ6(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ6_3(f,s)=YZ6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par6_3X = CircleFitByPratt(YZ6_3);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ6(i,1)>=2.25 && YZ6(i,1)<=2.4 && YZ6(i,2)>=1.02 && YZ6(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            YZ6_4(f,s)=YZ6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par6_4X = CircleFitByPratt(YZ6_4);
f=1;
for i=1:o;

```

```

if YZ6(i,1)>=1 && YZ6(i,1)<=1.2 && YZ6(i,2)>=0.9 && YZ6(i,2)<=1
    for s=1:2
        YZ6_5(f,s)=YZ6(i,s);
    end
    f=f+1;
end
end
Par6_5X = CircleFitByPratt(YZ6_5);
-----
//Estrazione delle coordinate y,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordX(i,1)>=Xmin7 && XYZordX(i,1)<=Xmax7
        for j=1:n
            XYZsez7X(k,j)=XYZordX(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
YZ7=[XYZsez7X(:,2) XYZsez7X(:,3)];
[o,p]=size(YZ7);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if YZ7(i,1)>=1.7 && YZ7(i,1)<=1.87 && YZ7(i,2)>=0.88 && YZ7(i,2)<=1
        for s=1:2
            YZ7_1(f,s)=YZ7(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_1X = CircleFitByPratt(YZ7_1);
f=1;
for i=1:o;
    if YZ7(i,1)>=1.89 && YZ7(i,1)<=2.05 && YZ7(i,2)>=0.88 && YZ7(i,2)<=1
        for s=1:2

```

```

                YZ7_2(f,s)=YZ7(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par7_2X = CircleFitByPratt(YZ7_2);
    f=1;
    for i=1:o;
        if YZ7(i,1)>=2.2 && YZ7(i,1)<=2.3 && YZ7(i,2)>=1 && YZ7(i,2)<=1.05
            for s=1:2
                YZ7_3(f,s)=YZ7(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par7_3X = CircleFitByPratt(YZ7_3);
    f=1;
    for i=1:o;
        if YZ7(i,1)>=2.3 && YZ7(i,1)<=2.4 && YZ7(i,2)>=1 && YZ7(i,2)<=1.05
            for s=1:2
                YZ7_4(f,s)=YZ7(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par7_4X = CircleFitByPratt(YZ7_4);
    f=1;
    for i=1:o;
        if YZ7(i,1)>=1 && YZ7(i,1)<=1.2 && YZ7(i,2)>=0.9 && YZ7(i,2)<=0.96
            for s=1:2
                YZ7_5(f,s)=YZ7(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par7_5X = CircleFitByPratt(YZ7_5);

```

---

```

//Estrazione delle coordinate x,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordY(i,2)>=Ymin1 && XYZordY(i,2)<=Ymax1
        for j=1:n
            XYZsez1Y(k,j)=XYZordY(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
XZ1=[XYZsez1Y(:,1) XYZsez1Y(:,3)];
[o,p]=size(XZ1);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=-10.54 && XZ1(i,1)<=-10.45 && XZ1(i,2)>=1.18 && XZ1(i,2)<=1.24
        for s=1:2
            XZ1_1(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_1Y = CircleFitByPratt(XZ1_1);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=-8.25 && XZ1(i,1)<=-8.15 && XZ1(i,2)>=0.99 && XZ1(i,2)<=1.04
        for s=1:2
            XZ1_2(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_2Y = CircleFitByPratt(XZ1_2);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=-8.15 && XZ1(i,1)<=-8.05 && XZ1(i,2)>=0.99 && XZ1(i,2)<=1.05

```

```

        for s=1:2
            XZ1_3(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_3Y = CircleFitByPratt(XZ1_3);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=-7.30 && XZ1(i,1)<=-7.20 && XZ1(i,2)>=1.11 && XZ1(i,2)<=1.14
        for s=1:2
            XZ1_4(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_4Y = CircleFitByPratt(XZ1_4);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=-3.70 && XZ1(i,1)<=-3.60 && XZ1(i,2)>=0.90 && XZ1(i,2)<=0.96
        for s=1:2
            XZ1_5(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_5Y = CircleFitByPratt(XZ1_5);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=-3.60 && XZ1(i,1)<=-3.50 && XZ1(i,2)>=0.90 && XZ1(i,2)<=0.96
        for s=1:2
            XZ1_6(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_6Y = CircleFitByPratt(XZ1_6);

```

```

f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=1.80 && XZ1(i,1)<=2 && XZ1(i,2)>=0.90 && XZ1(i,2)<=1
        for s=1:2
            XZ1_7(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_7Y = CircleFitByPratt(XZ1_7);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ1(i,1)>=7 && XZ1(i,1)<=7.09 && XZ1(i,2)>=0.94 && XZ1(i,2)<=1
        for s=1:2
            XZ1_8(f,s)=XZ1(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par7_8Y = CircleFitByPratt(XZ1_8);
-----
//Estrazione delle coordinate x,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordY(i,2)>=Ymin2 && XYZordY(i,2)<=Ymax2
        for j=1:n
            XYZsez2Y(k,j)=XYZordY(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
XZ2=[XYZsez2Y(:,1) XYZsez2Y(:,3)];
[o,p]=size(XZ2);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;

```

```

if XZ2(i,1)>=-10.6 && XZ2(i,1)<=-10.5 && XZ2(i,2)>=0.85 && XZ2(i,2)<=0.95
    for s=1:2
        XZ2_1(f,s)=XZ2(i,s);
    end
    f=f+1;
end
end
Par2_1Y = CircleFitByPratt(XZ2_1);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ2(i,1)>=-10.3 && XZ2(i,1)<=-10.2 && XZ2(i,2)>=0.74 && XZ2(i,2)<=0.85
        for s=1:2
            XZ2_2(f,s)=XZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
end
Par2_2Y = CircleFitByPratt(XZ2_2);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ2(i,1)>=-10.1 && XZ2(i,1)<=-10 && XZ2(i,2)>=0.7 && XZ2(i,2)<=0.81
        for s=1:2
            XZ2_3(f,s)=XZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
end
Par2_3Y = CircleFitByPratt(XZ2_3);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ2(i,1)>=-10.55 && XZ2(i,1)<=-10.45 && XZ2(i,2)>=1.18 && XZ2(i,2)<=1.25
        for s=1:2
            XZ2_4(f,s)=XZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
end
end

```

```

Par2_4Y = CircleFitByPratt(XZ2_4);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ2(i,1)>=17.9 && XZ2(i,1)<=18 && XZ2(i,2)>=1.05 && XZ2(i,2)<=1.2
        for s=1:2
            XZ2_5(f,s)=XZ2(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par2_5Y = CircleFitByPratt(XZ2_5);
-----
//Estrazione delle coordinate x,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordY(i,2)>=Ymin3 && XYZordY(i,2)<=Ymax3
        for j=1:n
            XYZsez3Y(k,j)=XYZordY(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
XZ3=[XYZsez3Y(:,1) XYZsez3Y(:,3)];
[o,p]=size(XZ3);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XZ3(i,1)>=-10.6 && XZ3(i,1)<=-10.45 && XZ3(i,2)>=1.2 && XZ3(i,2)<=1.3
        for s=1:2
            XZ3_1(f,s)=XZ3(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_1Y = CircleFitByPratt(XZ3_1);
f=1;

```

```

for i=1:o;
    if XZ3(i,1)>=-10.35 && XZ3(i,1)<=-10.2 && XZ3(i,2)>=0.78 && XZ3(i,2)<=0.87
        for s=1:2
            XZ3_2(f,s)=XZ3(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par3_2Y = CircleFitByPratt(XZ3_2);

```

---

//Estrazione delle coordinate x,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//

```

k=1;
for i=1:m;
    if XYZordY(i,2)>=Ymin4 && XYZordY(i,2)<=Ymax4
        for j=1:n
            XYZsez4Y(k,j)=XYZordY(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
XZ4=[XYZsez4Y(:,1) XYZsez4Y(:,3)];
[o,p]=size(XZ4);

```

---

//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//

```

f=1;
for i=1:o;
    if XZ4(i,1)>=-10.35 && XZ4(i,1)<=-10.2 && XZ4(i,2)>=0.75 && XZ4(i,2)<=0.9
        for s=1:2
            XZ4_1(f,s)=XZ4(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par4_1Y = CircleFitByPratt(XZ4_1);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ4(i,1)>=-10.7 && XZ4(i,1)<=-10.6 && XZ4(i,2)>=0.9 && XZ4(i,2)<=0.95

```

```

        for s=1:2
            XZ4_2(f,s)=XZ4(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par4_2Y = CircleFitByPratt(XZ4_2);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ4(i,1)>=-10.7 && XZ4(i,1)<=-10.6 && XZ4(i,2)>=0.95 && XZ4(i,2)<=1
        for s=1:2
            XZ4_3(f,s)=XZ4(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par4_3Y = CircleFitByPratt(XZ4_3);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ4(i,1)>=-10.6 && XZ4(i,1)<=-10.4 && XZ4(i,2)>=1.2 && XZ4(i,2)<=1.3
        for s=1:2
            XZ4_4(f,s)=XZ4(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par4_4Y = CircleFitByPratt(XZ4_4);

-----
//Estrazione delle coordinate x,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
f=1;
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordY(i,2)>=Ymin5 && XYZordY(i,2)<=Ymax5
        for j=1:n
            XYZsez5Y(k,j)=XYZordY(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end

```

```

        end
    end
    XZ5=[XYZsez5Y(:,1) XYZsez5Y(:,3)];
    [o,p]=size(XZ5);
    -----
    //Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
    f=1;
    for i=1:o;
        if XZ5(i,1)>=-10.7 && XZ5(i,1)<=-10.6 && XZ5(i,2)>=0.9 && XZ5(i,2)<=0.95
            for s=1:2
                XZ5_1(f,s)=XZ5(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par5_1Y = CircleFitByPratt(XZ5_1);
    f=1;
    for i=1:o;
        if XZ5(i,1)>=-10.7 && XZ5(i,1)<=-10.6 && XZ5(i,2)>=0.95 && XZ5(i,2)<=1.05
            for s=1:2
                XZ5_2(f,s)=XZ5(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par5_2Y = CircleFitByPratt(XZ5_2);
    f=1;
    for i=1:o;
        if XZ5(i,1)>=-10.6 && XZ5(i,1)<=-10.4 && XZ5(i,2)>=1.25 && XZ5(i,2)<=1.35
            for s=1:2
                XZ5_3(f,s)=XZ5(i,s);
            end
            f=f+1;
        end
    end
    Par5_3Y = CircleFitByPratt(XZ5_3);
    -----

```

```

//Estrazione delle coordinate x,z dei punti presenti all'interno del piano di sezione//
k=1;
for i=1:m;
    if XYZordY(i,2)>=Ymin6 && XYZordY(i,2)<=Ymax6
        for j=1:n
            XYZsez6Y(k,j)=XYZordY(i,j);
        end
        k=k+1;
    end
end
XZ6=[XYZsez6Y(:,1) XYZsez6Y(:,3)];
[o,p]=size(XZ6);
-----
//Determinazione dei parametri geometrici di una tubazione presente nella sezione//
f=1;
for i=1:o;
    if XZ6(i,1)>=-10.75 && XZ6(i,1)<=-10.6 && XZ6(i,2)>=0.9 && XZ6(i,2)<=0.95
        for s=1:2
            XZ6_1(f,s)=XZ6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par6_1Y = CircleFitByPratt(XZ6_1);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ6(i,1)>=-10.6 && XZ6(i,1)<=-10.5 && XZ6(i,2)>=1 && XZ6(i,2)<=1.1
        for s=1:2
            XZ6_2(f,s)=XZ6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par6_2Y = CircleFitByPratt(XZ6_2);
f=1;
for i=1:o;
    if XZ6(i,1)>=-10.6 && XZ6(i,1)<=-10.4 && XZ6(i,2)>=1.35 && XZ6(i,2)<=1.45

```

```

        for s=1:2
            XZ6_3(f,s)=XZ6(i,s);
        end
        f=f+1;
    end
end
Par6_3Y = CircleFitByPratt(XZ6_3);

```

## All.to n. 11 Codice PCL tubazioni corridoio

**INPUT: Nuvola di punti del soffitto del corridoio in formato .pcd**

**OUTPUT: 1) Nuvola di punti cluster in formato .pcd**

**2) Nuvola di punti dei cilindri in formato .pcd**

---

```

//Caricamento delle funzionalità necessarie//
include <iostream>
#include <vector>
#include <pcl/point_types.h>
#include <pcl/io/pcd_io.h>
#include <pcl/search/search.h>
#include <pcl/search/kdtree.h>
#include <pcl/kdtree/kdtree.h>
#include <pcl/features/normal_3d.h>
#include <pcl/visualization/cloud_viewer.h>
#include <pcl/filters/passthrough.h>
#include <pcl/segmentation/region_growing.h>
#include <pcl/ModelCoefficients.h>
#include <pcl/filters/extract_indices.h>
#include <pcl/sample_consensus/method_types.h>
#include <pcl/sample_consensus/model_types.h>
#include <pcl/segmentation/sac_segmentation.h>
#include <pcl/segmentation/extract_clusters.h>
#include <string>
#include <sstream>

//Definizione degli oggetti e delle variabili necessarie//
using namespace std;
typedef pcl::PointXYZ PointT;
int
main (int argc, char** argv)
{
    pcl::PCDWriter writer;
    pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr cloud (new pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>);
    pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr cloud2(new pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>);
    pcl::search::Search<pcl::PointXYZ>::Ptr tree =
boost::shared_ptr<pcl::search::Search<pcl::PointXYZ> > (new pcl::search::KdTree<pcl::PointXYZ>);
    pcl::PointCloud <pcl::Normal>::Ptr normals (new pcl::PointCloud <pcl::Normal>);
    pcl::PointCloud<pcl::Normal>::Ptr cloud_normals(new pcl::PointCloud<pcl::Normal>);
    pcl::search::KdTree<PointT>::Ptr tree(new pcl::search::KdTree<PointT>());
    pcl::NormalEstimation<PointT, pcl::Normal> ne;
    pcl::NormalEstimation<pcl::PointXYZ, pcl::Normal> normal_estimator;

```

```

pcl::ModelCoefficients::Ptr coefficients_cylinder(new pcl::ModelCoefficients);
pcl::PointIndices::Ptr inliers_cylinder(new pcl::PointIndices);
pcl::SACSegmentationFromNormals<PointT, pcl::Normal> seg;
pcl::ModelCoefficients::Ptr coefficients_plane(new pcl::ModelCoefficients);
pcl::PointIndices::Ptr inliers_plane(new pcl::PointIndices);
pcl::ExtractIndices<PointT> extract;
pcl::PointCloud<PointT>::Ptr cloud_plane(new pcl::PointCloud<PointT>());
pcl::RegionGrowing<pcl::PointXYZ, pcl::Normal> reg;
pcl::PCDReader reader;
-----
//Caricamento della nuvola di punti//
reader.read("corridoioF6completo.pcd", *cloud);
-----
//Stima delle normali ai punti//
normal_estimator.setSearchMethod (tree);
normal_estimator.setInputCloud (cloud);
normal_estimator.setKSearch(40);
normal_estimator.compute (*normals);
-----
//Settaggio parametri cluster//
reg.setMinClusterSize (500);
reg.setMaxClusterSize (10000000);
reg.setSearchMethod (tree);
reg.setNumberOfNeighbours (60);
reg.setInputCloud (cloud);
reg.setInputNormals (normals);
reg.setSmoothnessThreshold (3.0 / 180.0 * M_PI);
reg.setCurvatureThreshold (1);
-----
//Estrazione dei cluster dalla nuvola di punti//
std::vector <pcl::PointIndices> clusters;
reg.extract (clusters);
-----
//Creazione dei singoli cluster//
cout << "Number of clusters is equal to " << clusters.size () << endl;
cout << "First cluster has " << clusters[0].indices.size () << " points." << endl;
cout << "These are the indices of the points of the initial" <<
endl << "cloud that belong to the first cluster:" << endl;
int counter = 0;
while (counter < clusters[0].indices.size ())
{
    cout << clusters[0].indices[counter] << ", ";
    counter++;
    if (counter % 10 == 0)
        cout << endl;
}
cout << endl;
-----
//Salvataggio di ogni cluster in un file//
int j = 0;
for (vector<pcl::PointIndices>::const_iterator it = clusters.begin(); it != clusters.end(); ++it)
{
    pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>::Ptr cloud_cluster(new pcl::PointCloud<pcl::PointXYZ>);
    for (vector<int>::const_iterator pit = it->indices.begin(); pit != it->indices.end(); ++pit)
        cloud_cluster->points.push_back(cloud->points[*pit]); /*

```

```

        cloud_cluster->width = cloud_cluster->points.size();
        cloud_cluster->height = 1;
        cloud_cluster->is_dense = true;
        cout << "PointCloud representing the Cluster: " << cloud_cluster->points.size() << " data
points." << endl;
        stringstream ss;
        ss << "cloud_cluster_" << j << ".pcd";
        writer.write<pcl::PointXYZ>(ss.str(), *cloud_cluster, false); /*
        j++;
    }

```

```
string st1 = "cloud_cluster_";
```

```

string ext = ".pcd";
string filename;
for (int i = 0; i <= j; i++)
{
    stringstream ss;
    ss << i;
    filename = st1 + ss.str() + ext;
    cout << filename << "\n";
    reader.read(filename, *cloud2);
    cerr << "PointCloud has: " << cloud2->points.size() << " data points." << endl;
}

```

---

```

//Stima delle normali ai punti//
ne.setSearchMethod(tree);
ne.setInputCloud(cloud2);
ne.setKSearch(100);
ne.compute(*cloud_normals);

```

---

```

//Settaggio parametri modello planare//
seg.setOptimizeCoefficients(true);
seg.setModelType(pcl::SACMODEL_NORMAL_PLANE);
seg.setNormalDistanceWeight(0.05);
seg.setMethodType(pcl::SAC_RANSAC);
seg.setMaxIterations(1000);
seg.setDistanceThreshold(0.01);
seg.setInputCloud(cloud2);
seg.setInputNormals(cloud_normals);

```

---

```

//Ricerca dei punti della nuvola appartenenti al piano//
seg.segment(*inliers_plane, *coefficients_plane);
cerr << "Plane coefficients: " << *coefficients_plane << endl;

```

---

```

//Estrazione dei punti del piano dalla nuvola//
extract.setInputCloud(cloud2);
extract.setIndices(inliers_plane);
extract.setNegative(false);
extract.filter(*cloud_plane);
cerr << "PointCloud representing the planar component: " << cloud_plane->points.size() << "
data points." << endl;

```

```

if (cloud_plane->points.size() <= (cloud2->points.size()) / 2)
{

```

```

-----
//Settaggio parametri modello cilindrico//
    seg.setOptimizeCoefficients(true);
    seg.setModelType(pcl::SACMODEL_CYLINDER);
    seg.setMethodType(pcl::SAC_RANSAC);
    seg.setNormalDistanceWeight(0.01);
    seg.setMaxIterations(10000);
    seg.setDistanceThreshold(0.1);
    seg.setRadiusLimits(0, 0.2);
    seg.setInputCloud(cloud2);
    seg.setInputNormals(cloud_normals);
-----

//Ricerca dei punti della nuvola appartenenti al cilindro//

    seg.segment(*inliers_cylinder, *coefficients_cylinder);
    cerr << "Cylinder coefficients: " << *coefficients_cylinder << std::endl;
-----

//Salvataggio del cilindro in un file .pcd//
    extract.setInputCloud(cloud2);
    extract.setIndices(inliers_cylinder);
    extract.setNegative(false);
    pcl::PointCloud<PointT>::Ptr cloud_cylinder(new pcl::PointCloud<PointT>());
    extract.filter(*cloud_cylinder);
    cerr << "PointCloud representing the cylindrical component: " << cloud_cylinder-
>points.size() << " data points." << endl;
    stringstream st;
    st << "cloud_cylinder_" << i << ".pcd";
    writer.write<pcl::PointXYZ>(st.str(), *cloud_cylinder, false);
    }
-----

//Non salva il cilindro perché è un piano//
    else
    {
        cout << "E'un piano" << endl;
        system("pause");
    }
}
return (0);
}

```

COMMENTO:

Le due parti del codice eseguono le seguenti procedure:

- la prima parte dell'algoritmo seleziona parti della nuvola e unisce i punti a distanza ravvicinata discriminandoli in base alla forma della superficie; ciò avviene confrontando gli angoli tra le normali alle superfici prese nell'intorno dei singoli punti. Viene denominato cluster un insieme di punti appartenenti ad una porzione di superficie omogeneamente liscia. Pertanto l'output di questa parte dell'algoritmo è il set di cluster. Queste informazioni sono organizzate in file di estensione .pcd.
- nella seconda parte dell'algoritmo vengono utilizzati i file .pcd ottenuti precedentemente e vengono classificati in base a due forme geometriche semplici: i cilindri e i piani. Le

informazioni parametriche dei piani non vengono memorizzate, mentre l'output è rappresentato dai parametri dei cilindri stampati a schermo come nella prova n.4. Le nuvole sono salvate sottoforma di file con estensione .pcd.

## All.to n. 12 Tabelle coordinate centro sezioni tubazioni corridoio interrato

	Sezione 1 nel corridoio L=12 m				Sezione 2 nel corridoio L=12 m			
Tubo	Coordinate centro sezioni tubazioni (Y=cost.)				Coordinate centro sezioni tubazioni (Y=cost.)			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]
Tubo 1 PE	-1070,75	93,98	-1070,9	94,04	-1070,75	93,98	-1069,84	94,80
Tubo 2 PE	-1053,76	107,67	-1053,69	107,46	-1070,00	102,26	-1069,84	102,48
Tubo 1 Zincato	-1053,44	139,57	-1053,40	139,54	-1053,26	133,43	-1053,15	133,36
	Sezione 3 nel corridoio L=12 m				Sezione 4 nel corridoio L=12 m			
Tubo	Coordinate centro sezioni tubazioni (Y=cost.)				Coordinate centro sezioni tubazioni (Y=cost.)			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]
Tubo 1 PE	-1067,63	95,00	-1067,65	94,82	/	/	/	/
Tubo 1 Zincato	-1053,47	128,49	-1053,40	128,34	-1053,07	124,97	-1053,21	125,05
Tubo 2 Zincato	-1032,90	85,82	-1032,94	85,80	-1030,55	84,69	-1030,60	84,56
	Sezione 5 nel corridoio L=12 m				Sezione 6 nel corridoio L=12 m			
Tubo	Coordinate centro sezioni tubazioni (Y=cost.)				Coordinate centro sezioni tubazioni (Y=cost.)			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]	Xcentro [cm]	Zcentro [cm]
Tubo 1 PE	-1059,11	93,27	-1059,08	93,26	/	/	/	/
Tubo 1 Zincato	-1052,68	124,28	-1052,74	124,31	-1053,03	125,17	-1053,12	125,24
Tubo 2 Zincato	-1027,17	80,48	-1027,11	80,45	/	/	/	/
Tubo 3 Zincato	-1005,91	78,87	-1005,90	78,87	/	/	/	/

	Sezione 1 nel corridoio L=30 m				Sezione 2 nel corridoio L=30 m			
Tubo	Coordinate centro sezioni tubazioni (X=cost.)				Coordinate centro sezioni tubazioni (X=cost.)			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]
Tubo 3 PE	105,61	96,18	105,57	96,23	105,61	96,18	105,57	96,23
Tubo 4 PE	179,53	98,49	179,53	98,52	179,53	98,49	179,53	98,52
Tubo 5 PE	198,57	98,41	198,52	98,51	198,57	98,41	198,52	98,51
Tubo 6 PE	225,49	104,29	225,33	104,3	225,49	104,29	225,33	104,3
Tubo 7 PE	237,64	104,58	237,67	104,45	237,64	104,58	237,67	104,45
	Sezione 3 nel corridoio L=30 m				Sezione 4 nel corridoio L=30 m			
Tubo	Coordinate centro sezioni tubazioni (X=cost.)				Coordinate centro sezioni tubazioni (X=cost.)			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]
Tubo 4 PE	179,53	98,49	179,53	98,52	179,53	98,49	179,53	98,52
Tubo 5 PE	198,57	98,41	198,52	98,51	198,57	98,41	198,52	98,51
Tubo 6 PE	225,49	104,29	225,33	104,3	225,49	104,29	225,33	104,3
Tubo 7 PE	237,64	104,58	237,67	104,45	/	/	/	/
	Sezione 5 nel corridoio L=30 m				Sezione 6 nel corridoio L=30 m			
Tubo	Coordinate centro sezioni tubazioni (X=cost.)				Coordinate centro sezioni tubazioni (X=cost.)			
	Pratt		3DReshaper		Pratt		3DReshaper	
	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]
Tubo 4 PE	179,53	98,49	179,53	98,52	179,53	98,49	179,53	98,52
Tubo 5 PE	198,57	98,41	198,52	98,51	198,57	98,41	198,52	98,51
Tubo 6 PE	225,49	104,29	225,33	104,3	225,49	104,29	225,33	104,3
Tubo 7 PE	237,64	104,58	237,67	104,45	237,64	104,58	237,67	104,45
Tubo 4 Zincato	268,43	102,06	268,49	102,16	/	/	/	/
	Sezione 7 nel corridoio L=30 m							
Tubo	Coordinate centro sezioni tubazioni (X=cost.)							
	Pratt		3DReshaper					
	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]	Ycentro [cm]	Zcentro [cm]				
Tubo 6 PE	225,49	104,29	225,33	104,3				
Tubo 7 PE	237,64	104,58	237,67	104,45				