

POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Automazione
Dipartimento di Elettronica Informazione e Bioingegneria



POLITECNICO
MILANO 1863

STUDIO DELLE TECNICHE DI SEGMENTAZIONE
NELLA MISURA 3D X-Ray CT

Relatore: Prof. Giovanni Moroni
Correlatore: Ing. Stefano Petrò

Tesi di Laurea di:
Stefano Stablum
Matr. 764073

Anno Accademico 2015-2016

Ai miei genitori,
ai miei amici
e ad Elena

SOMMARIO

Negli ultimi anni la Computed Tomography (CT) ha trovato molte applicazioni nel campo della metrologia per misura dimensionale e geometrica. La tecnologia CT offre notevoli vantaggi rispetto ad altri sistemi di misura a coordinate, visto che con questo tipo di tecnologia è possibile analizzare sia le superfici interne che le superfici esterne dell'oggetto ed è in grado di distinguere materiali differenti. Esistono tuttavia numerose cause d'incertezza che influenzano l'intero processo di misura. Una delle fasi più delicate è la fase di segmentazione in cui vengono separati tra loro i vari materiali da cui è composto l'oggetto. Questo lavoro di tesi ha come primo obiettivo l'analisi degli algoritmi attualmente utilizzati per la segmentazione, cercando di evidenziarne i punti di forza e di debolezza. Il secondo obiettivo è quello di valutare le diverse prestazioni dei suddetti algoritmi in varie condizioni operative.

ABSTRACT

In last years computed tomography (CT), has become interesting in metrology for dimensional measurements. Its characteristic, like the capability of analyzing both inner and outer geometries of the object inspected or the independence from the nature of the surfaces allowed CT to become a direct competitor of the standard dimensional measurements systems such coordinate measurement machines with tactile or optical probe.

The various causes of uncertainty affecting the whole acquisition process, make CT difficult to standardize. In particular segmentation is one of the most sensible phase where different material who composed the object are split. This work has two main purposes. The first purpose is to analyze the different algorithms highlighting their strength points and their weakness. The second purpose is to evaluate algorithms performance in different operating conditions.

INDICE

1. Introduzione	1
2. Metrologia geometrica CT	5
2.1. Principi base	5
2.2. Hardware del sistema	6
2.3. Flusso di lavoro per la dimensional metrology	9
2.4. Parametri e fattori di influenza	10
2.5. Artefatti e rumore	12
2.5.1. Beam Hardening	12
2.5.2. Altri fattori d'imperfezione	14
2.6. Aspetti metrologici nelle misurazioni CT	16
2.6.1. Accuratezza	16
2.6.2. Calibrazione fattore di scala	16
2.6.3. Segmentazione	17
2.6.4. Risoluzione	18
2.6.5. Incertezza di misura	18
3. Algoritmi di segmentazione	19
3.1. Algoritmi basati sulla similarità dei valori di grigio	19
3.1.1. Global Thresholding	19
3.1.1.1. Otsu's method	21
3.1.1.2. Isodata	22
3.1.1.3. Metodo Bayesano	23
3.1.2. Local Thresholding	24
3.1.3. Hysteresis Thresholding	24
3.1.4. Region Growing	26
3.1.4.1. crescita in base al valore di grigio	27
3.2. Tecniche sulla discontinuità dei valori di grigio	28
3.2.1. Operatore di Sobel 2D	29
3.2.2. Estensione dell'operatore di Sobel al caso 3D	30
3.2.3. Algoritmo di Canny	33
3.2.3.1. Smoothing	34
3.2.3.2. Calcolo del gradiente	34
3.2.3.3. Non-maximum suppression	35
3.2.3.4. Double thresholding	36
3.2.3.5. Tracciamento bordi tramite isteresi	36
4. Scansione e ricostruzione	39
4.1. Campioni utilizzati	39
4.2. Scansione Campioni	41
4.3. Ricostruzione modello 3D	45

5. Sperimentazione	47
5.1. Sperimentazione sulla ripetibilità della misura	47
5.2. Sperimentazione per la valutazione dei fattori di influenza	48
5.3. Elaborazione Software	50
5.3.1. Hysteresis Thresholding	50
5.3.2. Region growing	52
5.3.3. Operatore di Sobel	55
5.3.4. Algoritmo di Canny	56
5.4. Esportazione modelli	59
5.5. Dati sperimentali	60
5.5.1. Dati sperimentali sulla ripetibilità	61
5.5.2. Dati sperimentali sulla valutazione dei fattori di influenza	70
6. Conclusioni	79
Appendice A	81
Appendice B	85
Appendice C	91
Bibliografia	103

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 Setup con detector 2D e con detector 1D. [2].....	5
Fig. 2 Schema di una tipica sorgente X-ray [1].....	6
Fig. 3 Spettro X-ray.....	7
Fig. 4 Influenza della corrente (a) e della tensione (b) sulla sorgente [1]	10
Fig. 5 Effetto del beam hardening con e senza l'utilizzo di un filtro fisico [1]	13
Fig. 6 Esempio di segmentazione di fibre in poliammide [6].....	17
Fig. 7 Istogramma Stepped Cylinder Al.....	21
Fig. 8 Esempio di Hysteresis Thresholding [3].....	25
Fig. 9 Pseudocodice di un generico algoritmo Region Growing.....	26
Fig. 10 Operatore di Sobel nelle direzioni x y z. [8].....	30
Fig. 11 Esempio di Non-maximum suppression.....	35
Fig. 12 Fasi di applicazione dell'algoritmo di Canny ad un'immagine.	37
Fig. 13 Assonometria Provini in Alluminio (a) e Titanio (b).....	39
Fig. 14 sistema tomografico X25.....	41
Fig. 15 Provino cal. geometria	43
Fig. 16 Scansione cal. geometria	44
Fig. 17 Singola scansione campione in alluminio.	44
Fig. 18 Fetta del campione in Al segmentato con hys3d.m.....	51
Fig. 19 Fetta del campione in alluminio segmentato RegionGrowing.m.....	53
Fig. 20 Sobel in 3 direzioni e Sobel in 5 direzioni per l'alluminio nella prima sperimentazione.....	56
Fig. 21 Campione di alluminio segmentato con l'algoritmo di Canny nella prima sperimentazione.....	57
Fig. 22 Screenshot software efX-View	60
Fig. 23 Influenza degli algoritmi e dei diametri sull'errore per l'alluminio nel primo esperimento	61
Fig. 24 Interaction plot per l'alluminio primo esperimento	62
Fig. 25 Test di normalità sui residui prima (a sinistra) e dopo (a destra) aver considerato la scansione.....	63
Fig. 26 Risultati dell'analisi della varianza per l'alluminio primo esperimento	63
Fig. 27 Grafico riassuntivo del modello lineare per l'alluminio nel primo esperimento	64
Fig. 28 equazione di regressione per l'alluminio nel primo esperimento	64
Fig. 29 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero, per l'alluminio nel primo esperimento.....	65
Fig. 30 Influenza degli algoritmi e dei diametri sull'errore per il titanio nel primo esperimento	66
Fig. 31 Interaction plot per il titanio nel primo esperimento.....	66
Fig. 32 Risultati dell'analisi della varianza per il titanio nel primo esperimento....	67

Fig. 33 Grafico riassuntivo del modello lineare per il titanio nel primo esperimento	68
Fig. 34 equazione di regressione per il titanio nel primo esperimento	68
Fig. 35 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero per il titanio nel primo esperimento	69
Fig. 36 Main effects plot per l'alluminio nel secondo esperimento.....	70
Fig. 37 Interaction plot per l'alluminio nel secondo esperimento	71
Fig. 38 Analisi della varianza per l'alluminio nel secondo esperimento	72
Fig. 39 Test di normalità sui residui per l'alluminio nel secondo esperimento	72
Fig. 40 Grafico riassuntivo del modello lineare per l'alluminio nel secondo esperimento	73
Fig. 41 Equazione di regressione per l'alluminio nel secondo esperimento.....	73
Fig. 42 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero per l'alluminio nel secondo esperimento.....	74
Fig. 43 Main effects plot per il titanio nel secondo esperimento.....	75
Fig. 44 Interaction plot per il titanio nel secondo esperimento	76
Fig. 45 Analisi della varianza per il titanio nel secondo esperimento	76
Fig. 46 Grafico riassuntivo del modello lineare per il titanio nel secondo esperimento	77
Fig. 47 Equazione di regressione per il titanio nel secondo esperimento.....	77
Fig. 48 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero per il titanio nel secondo esperimento.....	78
Fig. 49 Cartiglio provino in alluminio.....	81
Fig. 50 Cartiglio provino in titanio.....	82

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Parametri sperimentazione ripetibilità.....	48
Tabella 2 Parametri operativi Alluminio	49
Tabella 3 Parametri operativi Titanio	49
Tabella 4 Parametri utilizzati in hys3D.m nella prima sperimentazione	52
Tabella 5 Parametri utilizzati in hys3D.m nella seconda sperimentazione.	52
Tabella 6 Parametri utilizzati in RegionGrowing.m nella prima sperimentazione	54
Tabella 7 Parametri utilizzati in RegionGrowing.m nella seconda sperimentazione.....	54
Tabella 8 Parametri utilizzati nello script canny.m nella prima sperimentazione .	57
Tabella 9 Parametri utilizzati nello script canny.m nella seconda sperimentazione.....	58
Tabella 10 Errore sistematico dei vari algoritmi nell'alluminio primo esperimento	65
Tabella 11 Errore sistematico dei vari algoritmi nel titanio primo esperimento....	68
Tabella 12 Errore sistematico dei vari algoritmi nell'alluminio secondo esperimento	74
Tabella 13 Errore sistematico dei vari algoritmi nel titanio secondo esperimento.....	78
Tabella 14 Errori sistematici legati agli algoritmi.....	79
Tabella 15 Taratura campione in alluminio	83
Tabella 16 Taratura campione in titanio.....	83

1 Introduzione

Il primo scanner tomografico a raggi X venne messo a punto da G. Hounsfield nel 1969. La Computed Tomography (CT) inizialmente venne utilizzata solamente in ambito medico come metodo di imaging diagnostico. Nei primi anni 80 si pensò di applicare questa tecnologia per la material analysis e per i cosiddetti test non distruttivi [1].

Più recentemente la CT ha trovato applicazione nel campo della metrologia geometrica come alternativa ai sistemi tradizionali tattili o ottici. Rispetto a quest'ultimi infatti i sistemi CT offrono notevoli vantaggi:

- possono essere usati per analisi non distruttive;
- possono determinare superfici interne ed esterne;
- forniscono un'alta densità di informazioni;
- possono analizzare qualunque tipo di superficie, forma, colore o materiale fino al massimo spessore penetrabile dai raggi X.

La tecnologia CT ha tuttavia ancora degli svantaggi che ne limitano la diffusione in ambito metrologico. I principali svantaggi sono:

- non esistono procedure standard di test;
- errori di misurazione dovute ad artefatti introdotti dal sistema;
- incertezza di misura spesso sconosciuta;
- il massimo spessore penetrabile limita le dimensioni degli oggetti analizzabili.

In ambito metrologico una delle fasi di post-processing più delicate è la fase di segmentazione o “edge detection”, in cui vengono rilevati le superfici dell’oggetto e separati tra loro i vari materiali da cui è composto. Questa fase risulta essere di fondamentale importanza in questo ambito in quanto va ad influenzare direttamente la precisione di misura, che è l’obiettivo principale di ogni verifica metrologica.

Questo lavoro di tesi ha come primo obiettivo l’analisi degli algoritmi attualmente utilizzati per la segmentazione, cercando di evidenziarne i punti di forza e i punti di debolezza. Il secondo obiettivo è di valutare le prestazioni dei suddetti algoritmi, implementati in ambiente Matlab, tramite l’utilizzo di due campioni progettati seguendo normativa VDI/VDE 2617/2630.

La tesi è stata strutturata nei seguenti capitoli:

- 1) nel capito introduttivo viene descritta la problematica affrontata e vengono definiti gli obbiettivi della tesi;
- 2) nel secondo capitolo viene data una panoramica sulla metrologia geometrica basata sulla Computed Tomography;
- 3) nel terzo capito vengono illustrati i principali algoritmi utilizzati per la fase di segmentazione;
- 4) nel quarto capitolo vengono illustrate le fasi di scansione e ricostruzione dei campioni;
- 5) nel quinto capitolo viene presentata la fase di sperimentazione in cui verranno analizzati i casi, descritta la metodologia di applicazione degli algoritmi e presentati i risultati ottenuti;

- 6) nell'ultimo capitolo viene effettuato un riepilogo dei risultati dei vari algoritmi utilizzati e vengono tratte le conclusioni rispetto agli obiettivi prefissati.

2 Metrologia geometrica CT

2.1 Principi di base

In figura 1 è illustrato il setup di un sistema tomografico. Una sorgente genera un fascio di raggi X, mentre i raggi X si propagano all'interno dell'oggetto si ha un'attenuazione dovuta all'assorbimento e allo scattering. L'ammontare dell'attenuazione dipende dalla lunghezza percorsa nel materiale, dalla composizione del materiale, dalla sua densità e dall'energia dei raggi X. La misura di questa attenuazione consente di rilevare sia la presenza, e il tipo, di materiale sia la lunghezza percorsa all'interno dei vari materiali. L'attenuazione viene misurata rilevando i raggi X rimanenti dopo l'attraversamento dell'oggetto grazie all'utilizzo di un detector, e successivamente viene creata un'immagine 2D in scala di grigi, nel caso di un detector piano, o un profilo di grigio unidimensionale nel caso di un Line-detector.

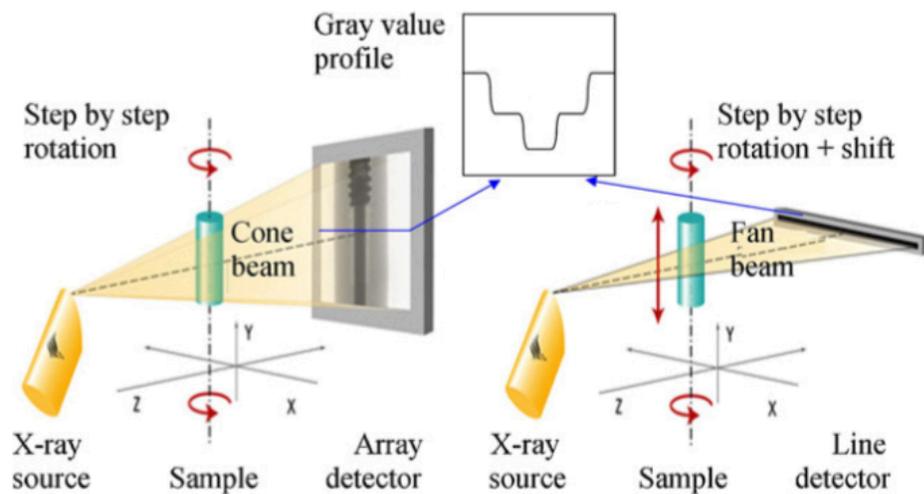


Fig. 1 Setup con detector 2D e con detector 1D. [2]

Le immagini vengono catturate in varie posizioni dell'oggetto. Una ricostruzione matematica delle immagini acquisite porta ad un modello 3D composto da voxel [3] (un voxel è l'equivalente di un pixel in 3 dimensioni), dove il valore di grigio contenuto nel voxel rappresenta l'assorbimento del materiale. Il passo successivo è il post-processing in cui il modello 3D viene inizialmente sottoposto ad una fase di segmentazione per riconoscere i bordi interni ed esterni dell'oggetto e successivamente alla fase di misurazione.

2.2 Hardware del sistema

La tipologia di sorgente più comune consiste in un cannone a fascio di elettroni contenente un catodo composto solitamente da un filamento di tungsteno, un anodo acceleratore, una griglia Wehnelt per controllare il fascio di elettroni (convergenza e intensità del fascio) e deflettori magnetici e lenti per focalizzare il fascio sul materiale bersaglio che emetterà i raggi X (figura 2).

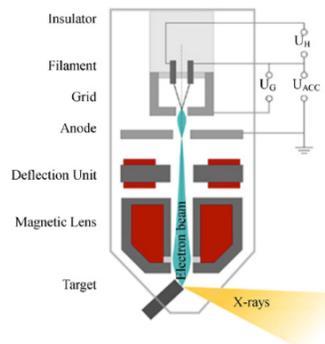


Fig. 2 Schema di una tipica sorgente X-ray [1]

Quando gli elettroni veloci colpiscono il bersaglio vengono rallentati improvvisamente, questa decelerazione causa una trasformazione della loro energia, in gran parte viene convertita in calore (oltre il 99%) mentre il restante 1% consiste nella radiazione a raggi X.

Macchie focali con un diametro inferiore a $1\ \mu\text{m}$ sono realizzabili con energie dei fotoni fino a 250 keV, definita come l'energia di un elettrone quando è accelerato da una tensione di 250 kV. All'uscita della sorgente il fascio viene generalmente modellato tramite il passaggio attraverso un'apertura circolare o diaframma (per raggi conici), oppure attraverso delle piastre di collimazione nel caso di raggi piani ed infine attraverso una finestra di berillio che isola il tubo a vuoto. Il "bersaglio" può essere realizzato con diversi materiali e può essere un bersaglio riflettente o trasmittente. In alcuni sistemi il "bersaglio" può essere realizzato con più materiali differenti in modo da consentire la realizzazione misure multi spettro.

Lo spettro della radiazione dipende dal materiale utilizzato per generare i raggi X ed è composto da due parti dette "Bremsstrahlung radiation" e "characteristic radiation".

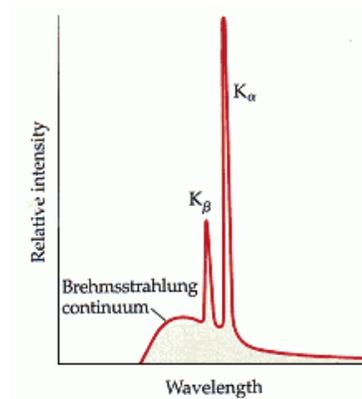


Fig. 3 Spettro X-ray.

La "Bremsstrahlung radiation" o radiazione di frenamento è la radiazione dominante e ha luogo quando un elettrone colpisce un nucleo atomico nel bersaglio, causando un'improvvisa decelerazione dell'elettrone e l'emissione di un fotone X. Questa radiazione ha uno spettro continuo che si estende da bassi valori di energia fino al valore di keV applicato alla sorgente.

La radiazione caratteristica invece ha luogo quando un elettrone ad alta energia impatta ed eccita un elettrone appartenente ad un atomo del bersaglio. Viene chiamata caratteristica perché dipende strettamente dal materiale con cui è realizzato il bersaglio ed ha uno spettro caratterizzato da due picchi. [4]

La radiazione generata viene caratterizzata tramite la sua distribuzione di energia (quality) e per la sua intensità (flux). La massima energia presente nello spettro della radiazione determina il massimo potere penetrante della stessa. L'intensità della radiazione viene misurata come la quantità di radiazione per unità di tempo.

I detector utilizzati per rilevare la radiazione possono consistere in un pannello piano (composto da un array bidimensionale di pixel), o da rilevatori monodimensionali retti o curvi. I detector monodimensionali offrono un'accuratezza maggiore, sono più efficienti e resistono a radiazioni maggiori. Tuttavia l'uso di detector di questo tipo, dato che possono rilevare solo una fetta per volta, comporta un dispendio di tempo molto più alto rispetto a quello necessario ad un detector bidimensionale.

La movimentazione dell'oggetto è affidata ad un sistema cinematico che provvede a ruotarlo (e a traslarlo nel caso di detector 1D) durante la scansione nello spazio compreso tra la sorgente e il rilevatore. Solitamente i sistemi cinematici consistono in :

- una tavola per la rotazione dell'oggetto continua o graduata;
- un'asse di traslazione orizzontale per il posizionamento dell'oggetto tra il rilevatore e la sorgente, chiamato anche asse d'ingrandimento;
- un'asse opzionale di traslazione orizzontale in direzione parallela al detector;

- un'asse di traslazione verticale. Nel caso di un sistema con detector piano quest'asse viene usato solo per il posizionamento dell'oggetto, mentre nel caso di rilevatori monodimensionale fornisce la traslazione necessaria per misurare ogni fetta dell'oggetto.

2.3 Flusso di lavoro per la dimensional metrology

Il flusso di lavoro è composto da molte fasi, le prime due fasi si riferiscono alle misurazioni fisiche mentre le altre sono tutte fasi di post-processing.

- **Calibrazione.** L'esecuzione di misurazioni precise richiede la calibrazione delle dimensioni dei pixel e del modello voxel. Questa fase viene spesso svolta misurando oggetti di riferimento calibrati. La calibrazione consente di individuare il fattore di scala che lega la dimensione dei pixel/voxel ad un'unità di lunghezza. È importante che questa fase venga effettuata per la posizione dell'asse di ingrandimento che coinciderà con quella utilizzata per la scansione dell'oggetto.
- **Scansione a raggi X.** Per eseguire la scansione vanno selezionati molti parametri, inoltre sia la scelta di filtri fisici da utilizzare che la direzione lungo cui posizionato l'oggetto influiscono sul risultato. Questo si traduce in un'alta influenza dell'operatore sulla buona riuscita di essa.
- **Pre-processing della proiezione grezza.** In questa fase vengono corretti i bad pixel, il beam hardening e qualche volta viene effettuata una correzione geometrica.
- **Ricostruzione del modello voxel dalle scansioni acquisite.**
- **Rescaling e segmentazione.**

- Conversione del modello voxel in superfici o modelli geometrici.
- Estrazione dei punti, caratteristiche e coordinate.
- Utilizzo di software CMM per estrarre misure e proprietà geometriche del modello ricostruito.

2.4 Parametri e fattori d'influenza

Il target della sorgente X-ray è caratterizzato dal suo tipo e dal materiale da cui è composto. Differenti materiali implicano un numero differente di protoni. Il numero di protoni influenza sia l'intensità della radiazione emessa sia il potere penetrante della stessa. Alcuni impianti tomografici offrono target multi-materiale che possono essere indicizzati per eseguire misure multi spettro consecutive. Nell'ambito della metrologia i bersagli sono del tipo riflettente in quando quelli di tipo trasmettente non resistono alle alte energie richieste da questa tipologia di applicazione.

La potenza del raggio è caratterizzata dalla corrente e dalla tensione applicate al filamento per la generazione del fascio di elettroni che colpirà il target. La corrente influenza direttamente l'intensità della radiazione ma non modifica la qualità (potere di penetrazione). La tensione applicata invece influenza sia l'intensità che la qualità della radiazione come mostrato in figura 4.

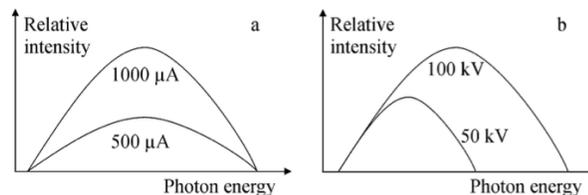


Fig. 4 Influenza della corrente (a) e della tensione (b) sulla sorgente [1]

La scelta della corretta combinazione di tensione e corrente è spesso molto difficile dato che deve tenere in considerazione molti fattori come il materiale da cui è composto l'oggetto, la sua geometria e la sua densità.

Il modo in cui i raggi X vengono attenuati durante il passaggio attraverso l'oggetto dipende in maniera sostanziale dal tipo di materiale attraversato e dal suo coefficiente di attenuazione μ . L'attenuazione nel range tipico delle applicazioni industriali CT (20-450 kV) è dovuta all'assorbimento fotoelettrico e allo scattering. L'assorbimento fotoelettrico si verifica quando la totalità dell'energia di un fotone viene trasferita ad un elettrone interno del materiale di target che viene emesso. Lo scattering invece è generato dall'interazione tra un fotone e un elettrone libero o un elettrone esterno causandone l'emissione. Questo effetto comporta una deflessione del raggio in una direzione differente causandone una perdita di energia. Entrambi gli effetti dipendono dall'energia, ma questa dipendenza è maggiore nel caso dell'assorbimento fotoelettrico. La probabilità che un fotone venga perso dal raggio originale è quindi funzione della sua energia, questo significa che il coefficiente di attenuazione μ non dipende esclusivamente dal materiale e dalla sua densità, ma è fortemente dipendente dall'energia del raggio. Il coefficiente μ limita ovviamente il massimo spessore che può essere penetrato, limitando quindi la massa e la lunghezza dell'oggetto da analizzare. L'esperienza dell'operatore risulta quindi determinante nell'individuare il posizionamento migliore dell'oggetto, in questa fase è importante cercare di minimizzare il massimo spessore da penetrare, ridurre il gap tra massimo e minimo spessore durante la rotazione per minimizzare gli effetti di saturazione ed è altrettanto importante cercare di evitare di avere superfici parallele al raggio al fine di minimizzare gli effetti di scattering.

Un altro importante fattore di influenza è la temperatura, nelle applicazioni metrologiche è richiesto che la misurazione sia effettuata a 20° e la deviazione da questa temperatura è spesso la maggior fonte di errore. Il controllo della temperatura in

questa tipologia di applicazioni è molto più critico rispetto ai sistemi CMM in quanto i sistemi CT contengono almeno un'importante fonte di calore al loro interno.

L'utente ha una grande influenza in tutte le rilevazioni tomografiche in quanto tutti i sistemi CT e i vari software di ricostruzione offrono una larga di possibilità di scelta dei parametri e delle strategie utilizzabili. I software per l'analisi CT spesso hanno vari livelli di utilizzo, in tal modo possono consentire ad operatori non particolarmente esperti di eseguire scansioni con una limitata scelta di parametri. L'influenza dell'operatore si estende inoltre alla fase di post-processing.

2.5 Artefatti e rumore

Gli impianti tomografici introducono nelle rilevazioni alcuni effetti indesiderati che vanno a disturbare la misura. Essi possono essere dovuti a vari fattori come ad esempio: il tipo di materiale, l'indurimento del fascio di raggi X o la conformazione geometrica dell'oggetto.

2.5.1 Beam hardening

Il Beam hardening è causato dal cosiddetto indurimento dei raggi X. Durante il passaggio dei raggi attraverso il materiale assorbente i fotoni a bassa energia (raggi X morbidi) vengono attenuati in maniera maggiore rispetto a quelli ad alta energia. Quindi dopo una certa distanza percorsa all'interno del materiale i raggi morbidi verranno completamente assorbiti dal materiale e solo i raggi x duri, cioè quelli composti da fotoni con energia maggiore, penetreranno completamente il materiale raggiungendo il detector. Questo significa che i primi millimetri di materiale assorbono una quantità maggiore di raggi X rispetto alla parte interna che assorbe solo i raggi duri. Questo effetto nell'immagine voxel ricostruita si traduce in una maggiore intensità dei contorni rispetto all'interno e allo sfondo come è chiaramente

visibile in figura 5. Questo effetto indesiderato può andare ad influenzare la fase di segmentazione e in maniera ancora più importante il riconoscimento corretto dei vari materiali nel caso di un oggetto multi-materiale.

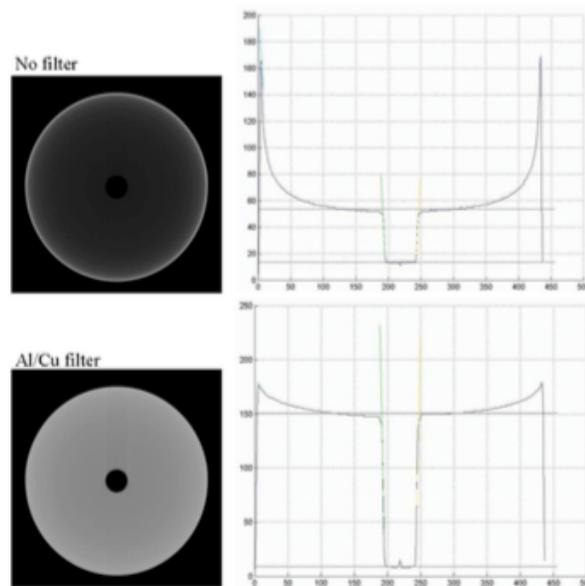


Fig. 5 Effetto del beam hardening con e senza l'utilizzo di un filtro fisico [1]

Per ridurre questo effetto si utilizzano dei filtri fisici posti tra la sorgente e l'oggetto da scansionare. Questi filtri consistono in lamine sottili, possibilmente realizzate con lo stesso materiale dell'oggetto da scansionare e provvedono ad eliminare i raggi morbidi prima che raggiungano l'oggetto. In questo modo l'oggetto verrà penetrato solo dai raggi duri. Questa tipologia di filtri ovviamente riduce l'intensità del fascio e quindi si avrà un rapporto segnale rumore inferiore. Questo effetto deve essere compensato prolungando il tempo di esposizione.

2.5.2 Altri fattori d'imperfezione

Oltre al beam hardening esistono altri disturbi causati dall'algoritmo di ricostruzione o da fenomeni fisici:

- Lo scattering è causato dalla deviazione dei raggi X all'interno dell'oggetto. Spesso causa un alone senza che ci sia una conformazione tale dell'oggetto e riduce il rapporto segnale rumore localmente. Valori dello scattering e dell'attenuazione dovuta ad esso possono essere trovati in letteratura. Esistono diversi algoritmi per la riduzione dello scattering, inoltre una scelta ottima del valore di soglia può aiutare a ridurlo.
- Gli artefatti ad anello (ring artifacts) sono causati da una non corretta correzione dei pixel difettosi o non ideali. Questo effetto causa anelli concentrici all'asse di rotazione.
- Gli artefatti metallici sono causati dalla presenza di sotto-volumi con un assorbimento molto maggiore delle altre parti dell'oggetto. Questo effetto si manifesta come una stella ad alta brillantezza che induce errori maggiori tanto più si è vicini al sotto-volume. Questo effetto è tipico delle scansioni multi-materiale.
- Il rumore è causato principalmente dalla quantizzazione dei fotoni stessi, ma può essere causato da altre fonti di rumore, come ad esempio il rumore elettronico del rivelatore.
- Gli artefatti di aliasing sono causati dalla presenza di parti geometriche che sono maggiori del campo di veduta. In letteratura talvolta anche gli artefatti

dovuti al sotto-campionamento durante l'acquisizione dell'immagine o durante la ricostruzione del modello vengono indicati come artefatti di aliasing. [3]

- Gli artefatti di campionamento vengono originati dal campionamento discreto o da una ridotta quantità di posizioni angolari in cui le proiezioni sono state acquisite.
- Il filtraggio effettuato con il filtro fisico riduce il beam hardening ma può introdurre disturbi, ad esempio può aumentare l'effetto dello scattering.
- L'asse di rotazione è supposto allineato parallelamente alla perpendicolare del rivelatore, in caso non vi sia un perfetto allineamento questo può causare imprecisioni nella scansione. Questo effetto è molto evidente nel caso di scansioni con un alto valore di ingrandimento.
- All'inizio della ricostruzione il software cerca di identificare la posizione degli assi attorno al quale è stato ruotato l'oggetto. Una mancanza di precisione nella stima può introdurre errori di ricostruzione.
- Il Feldkamp error è causato da fasci conici più grandi e dall'incompletezza delle proiezioni portando ad una distorsione della geometria visibile.

Per alcuni di questi errori esistono tecniche di compensazione o di correzione che possono agire sulle proiezioni durante la ricostruzione o dopo di essa. Inoltre ci sono alcune tecniche per ridurre l'impatto degli errori che modificano il flusso di lavoro del processo di misura.

2.6 Aspetti metrologici nelle misurazioni CT

2.6.1 Accuratezza

L'accuratezza della misura è influenzata da:

- L'accuratezza delle immagini 2D acquisite, è influenzata dalla dimensione dei pixel del detector, dall'ingrandimento, dalla nitidezza e dal contrasto dell'immagine, dal Beam hardening e dallo scattering etc.
- L'accuratezza della ricostruzione 3D invece dipende dall'accuratezza dell'algoritmo di ricostruzione, dalla dimensione dei voxel, dall'accuratezza nell'identificazione dell'asse di rotazione, dal Beam hardening e dallo scattering etc.
- Dagli errori introdotti quando le misure sono eseguite sul modello 3D.

2.6.2 Calibrazione del fattore di scala

Per ciascuna misura è necessario definire il fattore di scala, questo fattore tiene conto dell'ingrandimento (asse Z), la dimensione dei pixel, la dimensione dei voxel 3D e tutti gli altri fattori di influenza. Per identificare i fattori di scala si misura un oggetto dalle dimensioni note, composto solitamente da più sfere. Vengono usate le sfere dato che la determinazione della posizione del loro centro non viene influenzata dalle fasi di segmentazione e dal beam hardening. Un altro metodo utilizzato per scalare l'oggetto misurato è quello di misurare alcune parti dell'oggetto con un sistema CMM e usare quelle parti per scalare l'intero modello voxel. Se si utilizza questo metodo è importante però determinare una soglia appropriata per la segmentazione. Piuttosto che utilizzare sistemi CMM

per l'identificazione del fattore di scala CT è possibile fondere i due sistemi per compensare la minore accuratezza sulla geometria o sulla forma dell'oggetto, ottenuta con il sistema CT, attraverso le più precise misure CMM.

2.6.3 Segmentazione

La segmentazione è una fase di post-processing molto importante nelle applicazioni metrologiche. Una volta ricostruito il modello 3D è necessario separare l'oggetto dall'aria che lo circonda o, nel caso multi-materiale, separare i vari materiali che lo compongono. Generalmente le tecniche di segmentazione si dividono in base a due proprietà dei livelli di grigio: similarità e discontinuità.

Passando attraverso la fase di segmentazione, dal modello Voxel 3D è possibile estrarre la superficie che lo caratterizza. Questa fase risulta molto delicata in ambito metrologico, in quanto un errore nel riconoscimento della superficie caratteristica si traduce in un errore sulla misura.

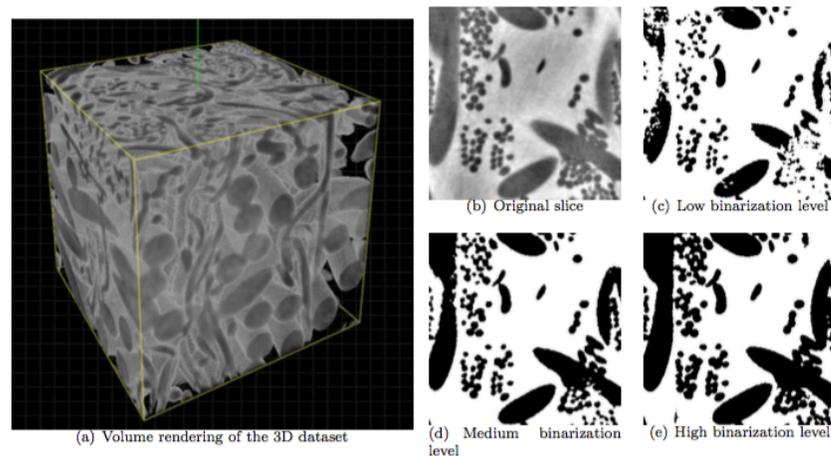


Fig. 6 Esempio di segmentazione di fibre in poliammide [6]

Esistono varie tecniche di segmentazione, sia 2D che 3D, e generalmente si basano sugli algoritmi per riconoscimento dei contorni nelle immagini. Alcuni software usati per la rilevazione di misure nelle immagini, come ad esempio il visualizzatore eFX-view, offrono la possibilità di applicare direttamente all'immagine dei filtri per il riconoscimento dei bordi. Ovviamente i metodi 2D possono essere utilizzati solo su immagini rappresentate una "fetta" della scansione mentre i metodi 3D permettono di lavorare direttamente sul modello tridimensionale.

2.6.4 Risoluzione

La risoluzione può essere definita come il più piccolo dettaglio che è percepibile attraverso il sistema. Per i sistemi CT si può fare una distinzione tra la risoluzione del massimo dettaglio percepibile nell'immagine 2D e la risoluzione del modello voxel 3D ricostruito.

2.6.5 Incertezza di misura

L'unica caratteristica che descrive la qualità di un risultato di una misurazione è l'incertezza di misura. Nei sistemi CT l'incertezza dipende da varie fattori quindi il calcolo della stessa può risultare complicato. Fino ad ora non è stato definito uno standard internazionale per valutare l'incertezza nelle misurazioni CT.

Sono applicabili differenti approcci per la stima dell'incertezza di misura CT:

- espressioni per il calcolo analitico dell'incertezza preventivata;
- simulazione di variabilità;
- determinazione sperimentale della variabilità sistematica e della variabilità stocastica;
- profonda conoscenza del caso e valutazione;
- combinazione dei metodi precedenti.

3 Algoritmi di Segmentazione

Come già introdotto in 2.5.3 gli algoritmi di segmentazione lavorano su due proprietà del valore di grigio contenuto nei voxel:

- similarità dei valori di grigio;
- discontinuità dei valori di grigio

3.1 Algoritmi basati sulla similarità dei valori di grigio

Storicamente per le applicazioni metrologiche vengono utilizzate tecniche che lavorano sulla similarità dei livelli di grigio. I principali approcci che si basano su questa logica sono:

- global thresholding;
- local thresholding;
- hysteresis thresholding;
- algoritmi region growing.

Con questo approccio si assume che l'oggetto si possa distinguere dallo sfondo (aria) grazie alla sua lucentezza, che è un'assunzione spesso valida per i set di dati 3D.

3.1.1 Global Thresholding

La Global Thresholding è la tecnica basata sui livelli di grigio più semplice e più diffusa. In questa tecnica si sceglie un valore di θ compreso tra il valore massimo e

il valore minimo del set di dati, rappresentanti i livelli di grigio contenuti nel modello, e si scelgono i voxel appartenenti all'oggetto secondo:

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x) \geq \theta \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

con

$$\begin{aligned} f(x) &\in \mathbb{R} \\ x &\in \Omega \end{aligned}$$

dove $f(x)$ rappresenta l'immagine definita nel dominio Ω . Possiamo pensare a Ω come uno spazio tridimensionale discreto che localizza i voxel. Mentre $g(x)$ è l'immagine segmentata, che ha lo stesso dominio dell'immagine originale, ma che assume solo valori binari indicanti l'appartenenza o meno del voxel all'oggetto.

L'equazione della Global Thresholding fornisce una completa descrizione dell'algoritmo di segmentazione, ma non fornisce alcuna indicazione sulla scelta del valore θ .

Non esiste una scelta ottima del valore θ , esistono vari approcci per trovare un valore da assegnare a θ . Alcuni di questi si basano su una conoscenza a priori, infatti spesso si ha una conoscenza completa delle caratteristiche fisiche del materiale, ed è quindi stimabile un valore adatto da assegnare a θ .

Un metodo molto utilizzato in ambito industriale è l'ISO50%. Viene creato un istogramma rappresentate i livelli di grigio del modello 3D che, nel caso di oggetto mono-materiale, presenterà due picchi distinti. Il primo rappresenta l'aria mentre il secondo rappresenta il materiale da cui è composto l'oggetto.

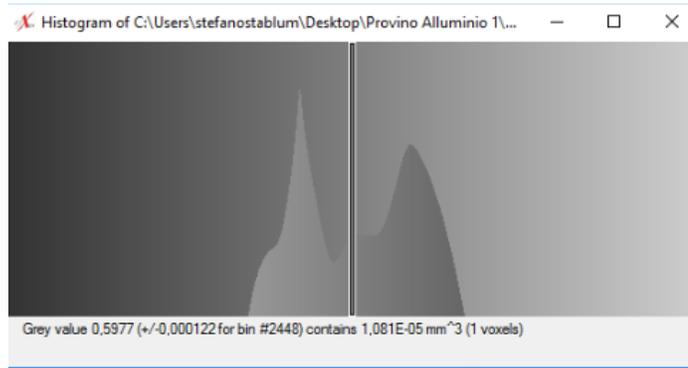


Fig. 7 Istogramma Stepped Cylinder Al.

Il metodo ISO 50% consiste nel posizionare la soglia esattamente a metà tra i due picchi rappresentati nell'istogramma (figura 7).

Esistono anche algoritmi utilizzati per la scelta del valore di θ , tra cui:

- metodo di Otsu;
- metodo Isodata;
- Bayesian thresholding;

La tecnica del global thresholding è di facile implementazione ma, anche in caso di una scelta ottimale di θ , da risultati scadenti in caso di un basso rapporto segnale rumore o quando l'intensità dei valori di grigio dell'oggetto e dello sfondo non sono costanti per tutto il volume.

3.1.1.1 Otsu's Method

Per la scelta di θ è possibile analizzare la distribuzione dei valori di grigio nell'istogramma: assumendo che l'istogramma contenga due picchi separati rappresentanti lo sfondo e il materiale d'interesse. Si vuole scegliere il minimo tra i

due picchi come soglia θ . Otsu definisce questa scelta come il valore che minimizza la somma pesata della varianza. Quindi per un'immagine rappresentata da valori discreti k contenuti nei voxel è:

$$\theta_{\text{Otsu}} = \operatorname{argmax}_{\theta} \left\{ \sum_{k < \theta} p(k)(\mu_0 - \mu)^2 + \sum_{k \geq \theta} p(k)(\mu_1 - \mu)^2 \right\}$$

dove

p è l'istogramma normalizzato

$$\mu := \operatorname{Mean}\{f(x)\}$$

$$\mu_1 := \operatorname{Mean}\{f(x) | f(x) \geq \theta\}$$

$$\mu_0 := \operatorname{Mean}\{f(x) | f(x) < \theta\}$$

Questo metodo è largamente utilizzato in letteratura e ed è uno strumento robusto per la scelta della soglia.

3.1.1.2 Isodata

Il metodo Isodata [7] è un metodo iterativo per il calcolo del valore di soglia. Come nel metodo di Otsu la soglia viene calcolata in modo che si venga a trovare tra i valori medi dello sfondo e dell'oggetto (μ_1 e μ_0), ma invece di cercare un punto ottimo globale la ricerca è effettuata localmente. Dato un valore iniziale $\theta^{(0)}$, ad esempio il 50% del massimo valore di grigio, l'algoritmo isodata può essere definito come:

- 1) un'iterazione i genera un'immagine binaria $g^{(i)}$ da f usando $\theta^{(i)}$;
- 2) calcola i valori medi di grigio $\mu_0^{(i)}$ e $\mu_1^{(i)}$ dei voxel appartenenti allo sfondo e di quelli appartenenti all'oggetto;
- 3) la nuova soglia viene calcolata come $\theta^{(i+1)} = (\mu_0^{(i)} + \mu_1^{(i)})/2$ e il processo viene ripetuto fino ad ottenere convergenza.

3.1.1.3 Metodo Bayesian

Da un punto di vista statistico, il problema della scelta della soglia è facilmente risolvibile se abbiamo un corretto modello dell'immagine. Nell'impostazione di questo metodo la probabilità a posteriori di osservare $f(x)$ è semplicemente $p(f(x)|j)$, dove $j \in \{0,1\}$ è l'etichetta non nota di appartenenza, ad esempio oggetto o sfondo. Il teorema di Bayes afferma che:

$$p(f(x)|j) \propto p(j)p(j|f(x))$$

Questa equazione può essere applicata per determinare la soglia θ globale. Assumendo che i valori di grigio dei voxel appartenenti all'oggetto o allo sfondo seguano la normale distribuzione significa che $\mu_1 \neq \mu_0$. Inoltre si può assumere che la variazione dei valore di grigio in ciascuna classe è uguale a: $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma$. Quindi la probabilità $p(j|f(x))$ è data da:

$$p(j|f(x)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(f(x) - \mu_j)^2}{2\sigma^2}\right)$$

dove μ_j è il valore medio condizionale definito come in 3.1.1.2, il valore di soglia ottimale può essere calcolato come:

$$\begin{aligned} \log p(\theta|0) &= \log p(\theta|1) \\ \log p(0) - \frac{1}{2\sigma^2}(\theta - \mu_0)^2 &= \log p(1) - \frac{1}{2\sigma^2}(\theta - \mu_1)^2 \\ \theta &= \frac{1}{2}(\mu_1 + \mu_0) + \frac{\sigma^2}{\mu_0 - \mu_1} \log \frac{p(0)}{p(1)} \end{aligned}$$

Questa equazione fornisce la soglia ottimale per separare due regioni che seguono una distribuzione gaussiana dei valori di grigio con differente media e

uguale varianza. La restrizione sull'ugual varianza può comunque essere eliminata.

3.1.2 Local Thresholding

Il metodo Local Thresholding nasce per compensare alcuni difetti dell'approccio globale descritto in precedenza. Un metodo comune di pre-processing nelle immagini 2D consiste nel calcolare l'intensità media della finestra intorno a ciascun pixel e sottrarla questo valore da ciascun pixel ("shading correction").

Con la stessa logica, ma senza modificare i valori del modello prima della segmentazione, si può un metodo di thresholding variabile nello spazio $\theta(x)$ per compensare le disomogeneità nell'intensità dei valori di grigio attraverso il volume.

$$g(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x) \geq \theta(x) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

Come nella Global Thresholding non viene fornita alcuna indicazione su come scegliere i valori da assegnare a $\theta(x)$.

3.1.3 Hysteresis Thresholding

Un problema molto comune nella segmentazione è che l'oggetto di interesse può essere ben definito dall'intensità del valore di grigio ad esso associato, ma ci sono anche altre formazioni (come ad esempio il rumore) con un alto valore. Un algoritmo a soglia classico potrebbe sottostimare la dimensione dell'oggetto (per una θ troppo grande) oppure includere il rumore nella ricostruzione dell'oggetto (per una θ troppo piccola).

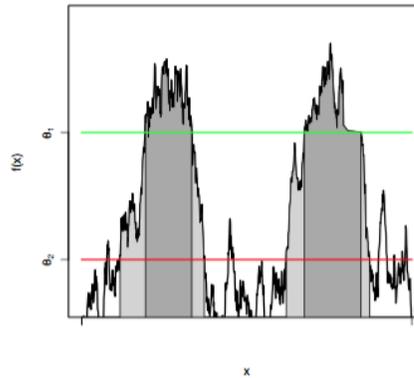


Fig. 8 Esempio di Hysteresis Thresholding [3]

Un modo di ovviare a questa situazione dove la distribuzione dei valori dei voxel appartenenti allo sfondo e all'oggetto si sovrappongono è l'Hysteresis Thresholding, conosciuto anche come double thresholding.

L'Hysteresis Thresholding usa due soglie $\theta_1 > \theta_2$ e parte dai voxel x con $f(x) \geq \theta_1$. Quindi tutti i voxel x' sono assegnati in maniera iterativa all'oggetto se sono adiacenti ad un voxel identificato come appartenente all'oggetto e se soddisfano la condizione $f(x') \geq \theta_2$.

Questa procedura assicura la segmentazione di regioni continue, composte da un numero di voxel "certi" e dai loro voxel adiacenti che possono anche avere un valore di intensità minore. Allo stesso tempo il rumore di fondo viene soppresso dalla soglia θ_1 .

Questo metodo, pur rientrando nella categoria dei metodi thresholding, mostra alcune similitudini con gli algoritmi basati sul region growing.

3.1.4 Region Growing

Gli algoritmi region growing si basano sul fatto che tutti i voxel appartenenti ad uno stesso oggetto sono “connessi” e simili in accordo con alcune proprietà. Un generico algoritmo espresso in pseudocodice è mostrato in figura 10.

```
1 funct RegGrow(seed) ≡  
2 |  
3   region.empty()  
4   region.add(seed)  
5   while region.HasNeighbour() do  
6     x := PopNeighbour(region)  
7     if M(x)  
8       region.add(x)  
9     fi  
10  od  
11  return(region)  
12  |.
```

Fig. 9 Pseudocodice di un generico algoritmo Region Growing

Partendo da un seme (*seed*) i voxel vicini vengono aggiunti alla regione fintanto che soddisfano alcune condizioni $M(x)$.

A parte la scelta di un appropriato sistema di vicinanza dei voxel e la scelta del seme sostanzialmente gli algoritmi Region Growing si differenziano tra loro per la scelta delle condizioni $M(x)$.

Esistono due macro-gruppi di algoritmi Region Growing che si dividono in due:

- procedura voxel based;
- split & merge.

Nel primo caso si considera l'oggetto come formato da gruppi di voxel (voxel based). Nel secondo caso invece "l'immagine" viene suddivisa in regioni più piccole fino ai singoli voxel, in seguito queste regioni vengono combinate in base al soddisfacimento di alcuni criteri di omogeneità.

3.1.4.1 Crescita in base al valore di grigio

Questo metodo è uno dei più comuni e si basa sulla constatazione che solitamente i valori di grigio di un oggetto sono contenuti in un range attorno ad un valore medio. Quindi durante la crescita di una regione viene calcolato il suo valore attuale e la sua deviazione standard, un nuovo voxel viene aggiunto se il valore rientra nel range attorno all'attuale valore medio della regione.

$$M(x) := (|f(x) - \mu_R| \leq c\sigma_R)$$

dove:

$$\begin{aligned} R &:= \{x' \mid x' \text{ belongs to region} \} \\ \mu_R &:= \text{Mean} \{f(x) \mid x \in R\} \\ \sigma_R &:= \sqrt{\text{Var} \{f(x) \mid x \in R\}} \end{aligned}$$

Escludendo il posizionamento del seme, l'unico parametro modificabile in questo metodo è $c \in \mathbb{R}^+$. Questo coefficiente rappresenta la massima deviazione ammissibile dal valore medio della regione.

Il problema principale di questo algoritmo riguarda il fatto che non può essere usato per segmentare oggetti composti da più parti non connesse tra loro, tuttavia esistono altri metodi basati sul Region Growing che permettono di segmentare correttamente anche queste tipologie di modelli.

I due più diffusi sono l'Adam Seeded Region Growing e il Non-connected Region Growing.

3.2 Tecniche sulla “discontinuità dei livelli di grigio”

Questo approccio, al contrario delle tecniche che si basano sulla similarità dei livelli di grigio, si basa su operatori differenziali che calcolano un valore approssimato del gradiente della funzione $f(x)$.

Esistono molti operatori matriciali per il calcolo approssimato del gradiente in un'immagine. Questi operatori vengono applicati all'immagine tramite l'operazione di convoluzione. Gli operatori più noti sono:

- operatore di Sobel

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

- operatore di Prewitt

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

- filtro di Roberts

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.1 Operatore di Sobel 2D

L'operatore di Sobel è un operatore differenziale discreto ed è uno dei più utilizzati per la segmentazione delle immagini 2D. Esso è composto dalla coppia di matrici 3×3 , S_x e S_y . Esistono kernel di dimensioni maggiori che lavorano sull'immagine in modo analogo, oltre alle matrici 3×3 altre dimensioni tipiche sono 5×5 e 7×7 .

La matrice S_x rileva le discontinuità lungo la direzione x mentre la matrice S_y rileva le discontinuità lungo la direzione y.

Applicando le due matrici all'immagine tramite convoluzioni si ottengono rispettivamente le equazioni discrete del gradiente lungo le due direzioni x e y.

$$G_x = \{g(x + 1, y - 1) + 2g(x + 1, y) + g(x + 1, y + 1)\} \\ - \{g(x - 1, y - 1) + 2g(x - 1, y) + g(x - 1, y + 1)\}$$

$$G_y = \{g(x - 1, y + 1) + 2g(x, y + 1) + g(x + 1, y + 1)\} \\ - \{g(x - 1, y - 1) + 2g(x, y - 1) + g(x + 1, y - 1)\}$$

La misura totale del gradiente è data dall'equazione:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Una volta trovato il valore del gradiente si può ricavare l'immagine segmentata ponendo una soglia sul gradiente stesso.

L'operatore di Sobel offre risultati migliori degli altri due operatori in virtù del peso doppio che viene dato al punto centrale. Questo peso differenziato conferisce all'algoritmo la capacità di ridurre il rumore presente.

3.2.2 Estensione dell'operatore di Sobel al caso 3D

Nel caso tridimensionale l'operatore è composto da 3 matrici multidimensionali che devono rilevare le discontinuità nelle tre direzioni x y z.

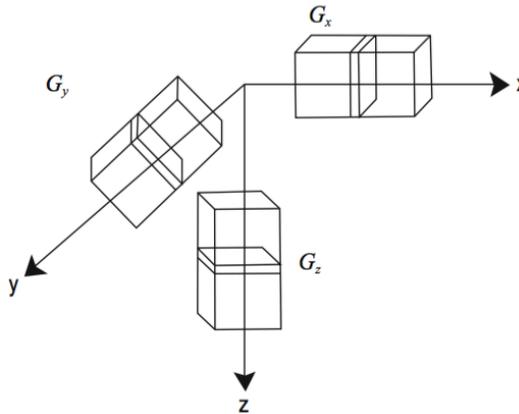


Fig. 10 Operatore di Sobel nelle direzioni x y z. [8]

La dimensione delle matrici di Sobel per l'analisi tridimensioni è 3 x 3 x 3. Gli operatori di convoluzione in direzione x, in direzione y e in direzione z sono:

in direzione x

$$S_x(:, :, -1) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_x(:, :, 0) = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 2 \\ -4 & 0 & 4 \\ -2 & 0 & 2 \end{bmatrix},$$

$$S_x(:, :, 1) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

in direzione y

$$S_y(:, :, -1) = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_y(:, :, 0) = \begin{bmatrix} -2 & -4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 2 \end{bmatrix},$$

$$S_y(:, :, 1) = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

e in direzione z

$$S_z(:, :, -1) = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ -2 & -4 & -2 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \quad S_z(:, :, 0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$S_z(:, :, 1) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

La misura totale del gradiente nel caso tridimensionale è data dall'equazione:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}$$

Analogamente al caso delle immagini bidimensionali è possibile ricavare il modello segmentato andando ponendo una soglia sul gradiente totale.

Così definito l'operatore di Sobel, al fine del calcolo del gradiente approssimato, considera solo le discontinuità lungo le tre direzioni x y z. Quindi fatica ad evidenziare le discontinuità in direzioni differenti dalle tre fondamentali.

Per migliorare le performance di questo operatore è possibile pensare di inserire altre matrici che per aumentare le direzioni considerate per il calcolo del gradiente.

Una possibilità è quella di definire due operatori diagonali S_{45} e S_{135} definiti come la rotazione della matrice S_x di rispettivamente 45° e 135° . [5]

$$S_{45}(:, :, -1) = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad S_{45}(:, :, 0) = \begin{bmatrix} -4 & -2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 4 \end{bmatrix},$$

$$S_{45}(:, :, 1) = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$S_{135}(:, :, -1) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad S_{135}(:, :, 0) = \begin{bmatrix} 0 & -2 & -4 \\ 2 & 0 & -2 \\ 4 & 2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$S_{135}(:, :, 1) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Questi due operatori diagonali sopperiscono bene al problema evidenziato nel paragrafo precedente rilevando con efficacia le discontinuità lungo queste direzioni diagonali.

La misura totale del gradiente, dopo la modifica proposta, sarà composta da cinque elementi, che rappresentano le componenti lungo le direzioni in cui viene calcolato, ed è data dall'equazione:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2 + G_{45}^2 + G_{135}^2}$$

L'immagine segmentata si ricava ponendo una soglia sul gradiente come nel caso precedente.

La soglia utilizzata in questi casi non ha nulla in comune con le soglie a cui si faceva riferimento nei metodi threshold esposti nel capitolo precedente. Infatti, mentre le

soglie di quei metodi andavano a valutare i livelli di grigio presenti nel voxel del modello, la soglia utilizzata nell'operatore di Sobel è una soglia sul gradiente che valuta la "pendenza" del gradiente oltre il quale viene considerata una discontinuità.

Proprio per il motivo sopracitato il valore di questa soglia non è confrontabile coi valori di grigio dei voxel, inoltre essa dipende intrinsecamente dal numero di componenti utilizzate per il calcolo del gradiente. Nel caso a cinque componenti infatti la soglia utilizzata sarà mediamente maggiore di quella utilizzata nel caso a tre componenti.

3.2.3 Algoritmo di Canny

L'algoritmo di Canny è stato sviluppato nel 1986 da John Canny [9], come algoritmo di segmentazione per le immagini piane. Questo metodo si basa, come il precedente, sulla ricerca del gradiente dell'immagine.

Rispetto agli operatori definiti in precedenza l'algoritmo di Canny introduce anche delle fasi di filtraggio. L'algoritmo si sviluppa essenzialmente in cinque step:

- **smoothing:** sfocatura dell'immagine per attenuare l'impatto del rumore;
- **calcolo del gradiente:** i bordi corrisponderanno a grandi valori di ampiezza del gradiente;
- **non-maximum suppression:** solo i massimi locali sono segnati come bordi;
- **double thresholding:** i potenziali bordi vengono individuati tramite una doppia soglia;

- **tracciamento dei bordi tramite isteresi:** I bordi vengono determinati eliminando tutti i bordi “deboli” non strettamente connessi a bordi “forti”.

Le fasi, per semplicità, verranno descritte in seguito nel caso bidimensionale da cui è immediata l'estensione al caso 3D.

3.2.3.1 Smoothing

Le immagini catturate dal sensore presenteranno sempre un certo quantitativo di rumore. Per evitare di considerare il rumore nel calcolo del gradiente in questa prima fase viene sfocata l'immagine mediante l'applicazione di un filtro Gaussiano, di cui si imposta la deviazione standard σ . Un esempio di filtro Gaussiano bidimensionale con $\sigma=1.4$ è:

$$B = \frac{1}{159} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

3.2.3.2 Calcolo del gradiente

Questa fase è sostanzialmente il processo descritto nel paragrafo 4.1, in quanto il calcolo del gradiente approssimato viene effettuato mediante l'applicazione all'immagine filtrata dell'operatore di Sobel già descritto in precedenza.

3.2.3.3 Non-maximum suppression

Lo scopo di questa fase è quello di convertire i bordi sfocati dell'immagine risultante dal calcolo del gradiente in bordi netti. In sostanza questa fase vengono mantenuti solo i massimi locali mentre viene cancellato tutto il resto. L'algoritmo agisce su ogni pixel in questo modo:

- arrotonda la direzione del gradiente θ al più vicino step di 45° , corrisponde all'uso di 8 pixel vicini;
- confronta l'intensità del bordo nel pixel corrente con la quella dei pixel nella direzione, positiva e negativa, del gradiente;
- se l'intensità del bordo nel pixel corrente è la più grande conserva il valore dell'intensità, altrimenti rimuove il valore.

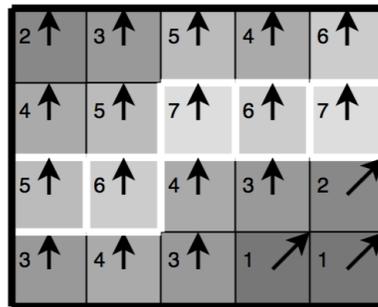


Fig. 11 Esempio di Non-maximum suppression.

In figura 11 è mostrato un esempio dell'applicazione dell'algoritmo di non-maximum suppression. Quasi tutti i pixel sono orientati verso nord, vengono quindi confrontati con quelli adiacenti e posizionati lungo la direzione del gradiente.

I pixel che risultano essere massimi vengono segnati in bianco mentre gli altri vengono soppressi.

3.2.3.4 Double thresholding

Dopo la soppressione dei non massimi i pixel che rappresentano i bordi mantengono l'informazione riguardo all'intensità. Molti di questi rappresenteranno i veri bordi dell'immagine mentre altri potrebbero essere dovuti al rumore o a variazioni di colore dovute alla rugosità della superficie. Per decidere quali pixel considerare si pone una prima soglia (high) che determinerà i pixel "forti"; viene utilizzata poi una soglia inferiore (low) che esclude tutti i pixel inferiori ad essa. I pixel compresi tra le due soglie vengono marcati come contorni "deboli".

3.2.3.5 Tracciamento dei bordi tramite isteresi

I bordi segnati come "forti" vengono considerati come bordi certi e vengono inclusi immediatamente nell'immagine finale. Mentre i bordi "deboli" vengono considerati come bordi dell'immagine solo se sono connessi ad un bordo forte.

La motivazione di questa scelta sta nel fatto che, ben ponendo la soglia high, è improbabile che i bordi forti siano causati da rumore. Quindi i bordi "forti" rappresenteranno solo i bordi reali dell'immagine, al contrario invece i bordi "deboli" possono essere veri bordi o essere causati da rumore.

I bordi dovuti al rumore probabilmente saranno distribuiti equamente nell'intera immagine e in maniera indipendente dai veri contorni, quindi solo una piccola parte di essi sarà sita nelle vicinanze dei bordi "forti". Per questa ragione i bordi deboli dovuti ai contorni reali dell'immagine saranno invece probabilmente connessi ai bordi forti.

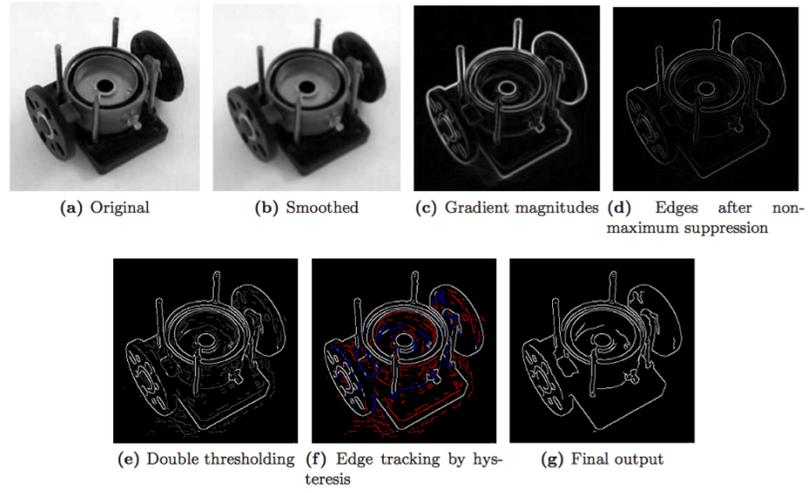


Fig. 12 Fasi di applicazione dell'algoritmo di Canny ad un'immagine.

4 Scansione e ricostruzione

In questo capitolo verranno mostrati i risultati sperimentali ottenuti mediante alcuni algoritmi di segmentazione implementati in ambiente Matlab.

4.1 Campioni utilizzati

Non essendo ancora stata definita una norma specifica per gli scanner tomografici, nella progettazione dei campioni di test sono state utilizzate le linee guida fornite dalla normativa tedesca VDI/VDE 2630/2617 che ricalca la più famosa ISO10360 dedicata ai sistemi CMM.

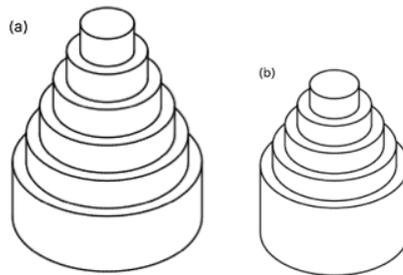


Fig. 13 Assonometria Provini in Alluminio (a) e Titanio (b)

I campioni sono stati progettati mediante l'utilizzo del software di modellazione 3D Autodesk Inventor. Successivamente sono stati realizzati con l'ausilio di un tornio e consistono in cilindri concentrici sovrapposti come mostrato in figura 13. Le caratteristiche dettate dalla norma per la progettazione sono:

- numero gradini compreso tra 5 e 10;
- rapporto tra altezza e diametro maggiore compreso tra 0,8 e 1,2;

- incremento del diametro lineare;
- scalini della medesima misura;
- centro coassiale.

Sono stati realizzati due provini, uno di alluminio e uno di titanio. Il massimo diametro scelto per l'alluminio è di 28mm mentre per il titanio è di 18mm. La differenziazione di diametri si è resa necessaria a causa del maggior coefficiente di assorbimento del titanio.

Come si vede in figura 13 ci si è discostati dalla norma per quanto riguarda l'altezza del primo gradino, esso infatti ha un'altezza di 10mm in entrambi i provini realizzati. Questa scelta è dovuta alla necessità di avere una parte su cui effettuare l'afferraggio per la misurazione di taratura tramite CMM.

Nell'appendice A sono disponibili i risultati completi della taratura CMM e il cartiglio di entrambi i provini.

4.2 Scansione Campioni

Per la scansione dei campioni è stato un sistema tomografico X25 prodotto da North Star Imaging progettato per applicazioni metrologiche.



Fig. 14 sistema tomografico X25

Il sistema tomografico è composto da:

- manipolatore controllabile via software o tramite console di comando hardware;
- generatore di raggi X prodotto dal X-Ray Wrox mod. XWT-160-TC, utilizzando il tungsteno come materiale di target;
- detector piano prodotto da Dexela mod. 1512N-C16-DRZS;
- calcolatori con software dedicati utilizzati per l'acquisizione delle immagini e per la ricostruzione dell'oggetto.

Le scansioni sono state effettuate per due tipologie di sperimentazione:

- sperimentazione per valutare la ripetibilità delle misure ottenute;
- sperimentazione completa per valutare l'influenza di alcuni parametri sulle misure ottenute.

Nella sperimentazione per la valutazione della ripetibilità, per minimizzare gli effetti di beam hardening dovuti all'indurimento dei raggi X, la scansione è stata effettuata utilizzando un filtro fisico, nel caso del titanio è stato utilizzato un filtro fisico di rame, mentre nel caso dell'alluminio ne è stato utilizzato uno di alluminio. Per quanto riguarda invece la seconda sperimentazione sono state effettuate scansioni sia in presenza di filtro fisico sia senza di esso.

Prima di effettuare la scansione il sistema necessita di una fase di warmup e poi di una fase di taratura della geometria e di calibrazione del sensore. Le fasi di taratura e calibrazione devono essere effettuate una volta trovata la posizione definitiva del manipolatore. Questo comporta la necessità di analizzare una singola radiografia del provino per la valutazione della posizione ottimale.

La fase di calibrazione del sensore si articola in due fasi: la prima consiste in un controllo manuale effettuato sui pixel effettuando una scansione "a vuoto", in questa fase vengono rilevati e esclusi eventuali pixel non funzionanti del detector; la seconda parte invece è una correzione automatica volta a uniformare la risposta dei pixel. Vengono effettuate tre scansioni impostando una differente corrente di eccitazione (ad esempio 60 μA 40 μA e 20 μA) più una assegnando alla corrente un valore nullo, questa corrente è detta "corrente di buio". Una volta eseguite le scansioni il software provvede ad effettuare le correzioni necessarie per uniformare la risposta dei pixel.

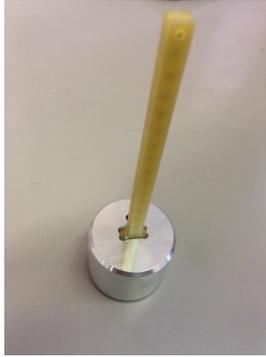


Fig. 15 Provino cal. geometria

La fase di calibrazione geometrica viene effettuata scansionando il provino appositamente fornito dai produttori mostrato in figura 15. Il provino è composto da una base in acciaio e da una colonnina verticale in polimeri contenente delle sfere calibrate equidistanti di piombo.

Il sistema provvede ad effettuare una scansione del provino durante una rotazione del piatto di 360° tracciando le orbite ellittiche percorse dalle sfere come mostrato in figura 16. Dalle orbite delle sfere è possibile effettuare la correzione dell'errore geometrico. Ai fini di questa correzione automatica almeno tre sfere devono restare nella finestra di acquisizione per l'intera rivoluzione.

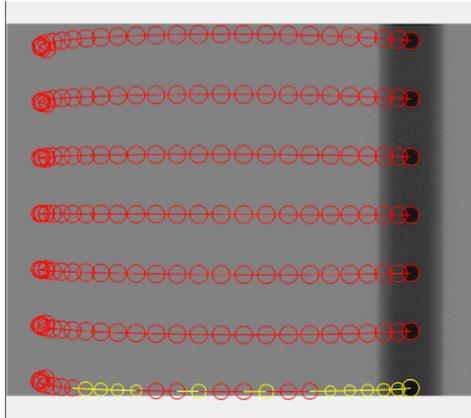


Fig. 16 Scansione cal. geometria

Entrambe le procedure vanno ripetute ad ogni ciclo di warmup della macchina o ad ogni modifica della posizione del manipolatore.

Una volta esaurite le fasi di taratura del sistema si può passare alla scansione degli oggetti, in figura 17 è mostrata una singola radiografia del campione in alluminio.

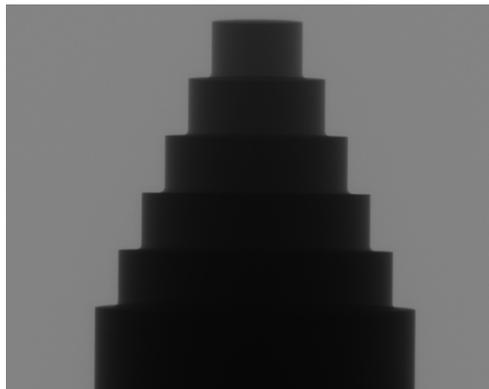


Fig. 17 Singola scansione campione in alluminio.

4.3 Ricostruzione Modello 3D

Una volta completata la scansione si può passare alla ricostruzione del modello 3D tramite il software eFX-CT. La ricostruzione si articola in 4 step principali:

- Verifica e correzione dello scostamento tra la prima e l'ultima scansione acquisita. In questa fase è stata utilizzata la funzionalità di correzione automatica offerta dal software.
- Valutazione e selezione del volume da ricostruire. In questa fase, utilizzando una ricostruzione molto grezza, si può impostare manualmente il volume da ricostruire. Questa opzione consente di evitare di ricostruire parti di non interesse evitando un dispendio temporale inutile.
- Fine reference tuning in cui si sceglie tra varie scansioni quella che presenta le migliori caratteristiche.
- Correzione software del veam hardening. Anche in questa fase è stata utilizzata la funzionalità di correzione automatica.

Esauriti questi step si passa alla ricostruzione del Modello.

5 Sperimentazione

L'esperimento presenta vari fattori di influenza, nella fattispecie:

- materiali differenti;
- vari diametri;
- livelli di energia utilizzati;
- presenza o assenza di un filtro fisico;
- algoritmi di segmentazione;

I primi due fattori sono intrinseci e dipendono dai campioni utilizzati, mentre gli altri possono essere variati al fine di valutarne l'influenza.

Come già accennato in 4.2 sono state effettuate due tipologie di sperimentazioni:

- sperimentazione sulla ripetibilità della misura;
- sperimentazione completa per la valutazione dei fattori di influenza non intrinseci (livelli di energia e presenza di filtro fisico).

I risultati di entrambe le sperimentazioni sono poi segmentati con gli algoritmi presentati nel capitolo 3 la cui applicazione verrà discussa nel prossimo capitolo.

5.1 Sperimentazione sulla ripetibilità della misura

In questa sperimentazione sono state eseguite tre repliche delle scansioni sia per il campione in alluminio, sia per quello in titanio. Al fine di minimizzare gli effetti di

beam hardening le scansioni sono state eseguite ponendo un filtro fisico tra la sorgente e il campione da esaminare. In tabella 1 sono mostrati i parametri utilizzati nella fase di acquisizione.

Tabella 1 Parametri sperimentazione ripetibilità

Camp	# imm med.	Tensione	Corrente	Filtro fisico
Al	4	90 kV	110 μ A	Al 1.3 mm
Ti	4	160 kv	60 μ A	Cu 0.3 mm

L'obiettivo di questa sperimentazione è valutare la ripetibilità delle misure eseguite mediante l'impianto tomografico dell'impianto tomografico, e valutare l'influenza dei vari algoritmi di segmentazione sulla misura. Al fine di una corretta valutazioni tutte le scansioni sono state effettuate lasciando immutate le condizioni di misura.

5.2 Sperimentazione per la valutazione dei fattori d'influenza

Nella seconda sperimentazione è stato realizzato un piano 2ⁿ, con l'ausilio del software Minitab, per la valutazione dell'influenza del livello di energia utilizzato per l'acquisizione e dell'influenza del filtro fisico. Il piano prevede quindi 8 prove, due repliche per ogni combinazione dei due fattori:

- filtro fisico presente o assente;
- alto livello di energia e basso livello di energia.

Per evitare di arrivare alla saturazione del sensore del tomografo nella valutazione dei livelli di energia è importante tenere conto della presenza o assenza del filtro fisico. Tenere un livello di energia troppo alto causerebbe la cosiddetta "bruciatura"

dell'immagine. Si è deciso quindi di lavorare a voltaggio costante (alto o basso) andando a scegliere poi una corrente tale da mantenere l'istogramma dell'immagine al centro, evitando così la saturazione. In tabella 2 e in tabella 3 sono raccolti i parametri operativi utilizzati per la sperimentazione.

Tabella 2 Parametri operativi Alluminio

Livello	Filtro Fisico	Tensione	Corrente
Alto	No	90 kv	35 μ A
Alto	Si	90 kV	60 μ A
Basso	No	60 kV	95 μ A
Basso	Si	60 kV	140 μ A

Il software utilizzato per progettare l'esperimento, e che sarà utilizzato anche per analizzare i risultati, fornisce anche l'ordine di esecuzione delle prove garantendo così una totale casualizzazione dell'esperimento.

Tabella 3 Parametri operativi Titanio

Livello	Filtro Fisico	Tensione	Corrente
Alto	No	160 kv	14 μ A
Alto	Si	160 kV	45 μ A
Basso	No	100 kV	95 μ A
Basso	Si	100 kV	98 μ A

5.3 Elaborazione software

Per segmentare il modello tridimensionale è stato utilizzato Matlab, in appendice C sono presenti alcuni degli script utilizzati.

Una volta ricostruito il modello 3D dell'oggetto dal visualizzatore è possibile esportarlo come uno stack di immagini. Le immagini possono essere esportate nei formati più comuni e rappresentano le fette dell'oggetto lungo la direzione desiderata.

Si rende quindi necessario una procedura per archiviare il solido in ambiente Matlab. Lo script `acq.m` permette di acquisire tutte le immagini e di ricreare il modello 3D mediante l'uso di una matrice tridimensionale.

$$[A] = \text{acq}(\text{nomefile}, \text{numimm}, \text{est})$$

I parametri richiesti in ingresso dallo script sono il nome del primo file senza il numero progressivo, il numero delle immagini da acquisire e l'estensione dei file da acquisire.

La matrice A rappresenta il modello 3D e quindi si può passare alla fase di segmentazione. Sono stati utilizzati cinque diversi metodi di segmentazione tridimensionale del modello.

5.3.1 Hysteresis thresholding

Il primo metodo utilizzato è il metodo del Hysteresis Thresholding descritto in 3.3. Questo metodo, come mostrato in figura 18, condivide certi aspetti con gli algoritmi Region Growing. Infatti non rileva strettamente i bordi del solido ma è utile per separare i vari materiali tra di loro (nel nostro caso il materiale dall'aria).

$$[M]=\text{hys3d}(\text{im}, \text{lt}, \text{ht}, \text{conn})$$

Lo script richiede in ingresso quattro parametri: l'immagine da elaborare (2D o 3D), la soglia inferiore, la soglia superiore, e il parametro connettività; e fornisce in uscita una matrice logica (2D o 3D) rappresentante l'insieme del materiale d'interesse.

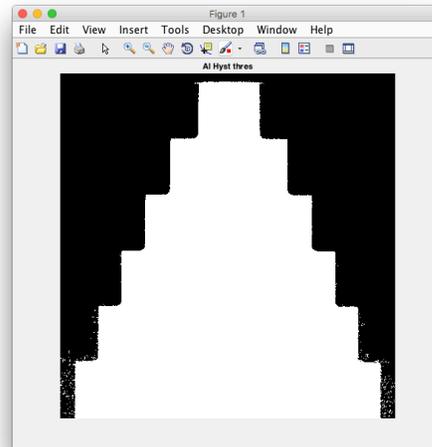


Fig. 18 Fetta del campione in Al segmentato con hys3d.m

Quest'ultimo parametro serve ad impostare il numero di “connessioni” tra i pixel/voxel che vogliamo considerare. Nel caso 2D può assumere i valori 4 e 8 mentre nel caso 3D i valori 6,18,26. Per la scelta delle sue soglie sono stati analizzati i valori di grigio di vari pixel di alcune fette con la funzione *impixel*. Per quanto riguarda il numero di connessioni è stato invece scelto il valore intermedio (18) per avere un buon compromesso tra risultato e potenza di calcolo necessaria. In tabella 4 e in tabella 5 sono riportati i parametri utilizzati per la segmentazione.

Tabella 4 Parametri utilizzati in hys3D.m nella prima sperimentazione

Materiale	Soglia inferiore	Soglia superiore	connessioni
Al	0.3	0.6	18
Ti	0.5	0.8	18

Tabella 5 Parametri utilizzati in hys3D.m nella seconda sperimentazione.

Materiale	# Scansione	Soglia inf	Soglia super	connessioni
Al	1 2	0.3	0.7	18
Al	3 4 5 6 7 8	0.4	0.7	18
Ti	2 3 4 5 6	0.4	0.7	18
Ti	6 7 8	0.6	0.8	18

5.3.2 Region growing

Il secondo metodo di segmentazione utilizzato si basa su un algoritmo region growing. Come l'algoritmo precedente anche questo non fornisce strettamente i contorni dell'oggetto.

```
lMask = RegionGrowing(dImg, dMaxDif, iSeed)
```

Per incrementare le prestazioni del calcolatore questo script è basato su uno script CPP da compilare prima di eseguire lo script Matlab. Lo script funziona sia per immagini bidimensionali che per matrici tridimensionali.

RegionGrowing.m richiede in ingresso tre parametri: l'immagine o la matrice da segmentare, la differenza massima accettata per l'appartenenza all'oggetto e la posizione del voxel di partenza (seme). In uscita fornisce una matrice logica come il

precedente. La condizione d'uscita dallo script è l'assenza di pixel/voxel adiacenti con una differenza d'intensità minore di quella impostata.

La matrice rappresentanti i vari modelli hanno dimensioni molto elevate, pertanto per evitare un errore di memoria, dovuto alla grande quantità di dati da elaborare, si è reso necessario eseguire lo script spezzando in due parti distinte la matrice rappresentante il modello 3D. Dopo la segmentazione le due parti sono state riunite tramite la funzione nativa di Matlab "cat" che consente di concatenare due matrici N-dimensionali.

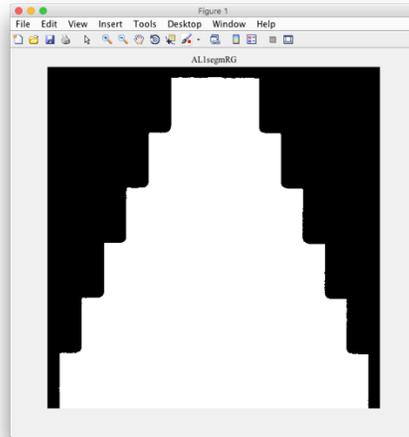


Fig. 19 Fetta del campione in alluminio segmentato
RegionGrowing.m

Come semi sono stati scelti sempre i due valori centrali di ogni sotto-matrice mentre la massima differenza di valore di grigio è stata scelta valutando i valori di grigio delle varie scansioni come nel caso precedente. I valori dei parametri utilizzati per la prima sperimentazione in sono riportati in tabella 6. Mentre quelli relativi alla seconda sperimentazione sono riportati in tabella 7.

Tabella 6 Parametri utilizzati in RegionGrowing.m
nella prima sperimentazione

Materiale	Max diff d'Intensità	Seme
Al	0.25	[350 680 682]
		[350 680 682]
Ti	0.25	[300 671 744]
		[300 671 744]

Tabella 7 Parametri utilizzati in RegionGrowing.m
nella seconda sperimentazione

Materiale	# Scansione	Max diff d'Intensità	Seme
Al	1 2 3 4 5 6 7 8	0.25	[350 680 682]
			[350 680 682]
Ti	1 2 5 6 7 8	0.25	[300 671 744]
			[300 671 744]
Ti	3 4	0.2	[300 671 744]
			[300 671 744]

5.3.3 Operatore di Sobel

Per quanto riguarda i metodi di segmentazioni basati sulla discontinuità dei valori di grigio sono stati implementati in Matlab le due versioni dell'Operatore di Sobel proposte in 4.2. Entrambe le versioni, basandosi sulla ricerca del gradiente forniscono in uscita i soli bordi dell'oggetto come rappresentato in figura 20.

```
[edgematrix,E] = sobel3D(originalMatrix, threshold)
```

```
[edgematrix,E] = sobel3Dpiudiag(originalMatrix, threshold)
```

Entrambi gli algoritmi richiedono in ingresso la matrice 3D da segmentare e il valore di soglia da utilizzare per calcolare la matrice logica. Si ricorda che, come già trattato in 3.2, questa soglia non è sull'intensità dei valori di grigio dei voxel del modello ma è una soglia sul gradiente.

In uscita gli script forniscono sia la matrice logica 3D che rappresenta l'oggetto segmentato, sia la matrice 3D che contiene al suo interno i valori del calcolo del gradiente approssimato.

In questo caso l'unico parametro da scegliere è la soglia che, salvo alcuni piccoli aggiustamenti, è stata fissata nei seguenti valori:

- Sobel 3D soglia= 2
- Sobel 3D 5 d soglia= 2.5

Il più grande limite di questo algoritmo è il fatto che essendo un operatore che lavora sul gradiente e essendo privo di una fase di deblurring fornisce in uscita immagini abbastanza rumorose come mostrato in figura 20.

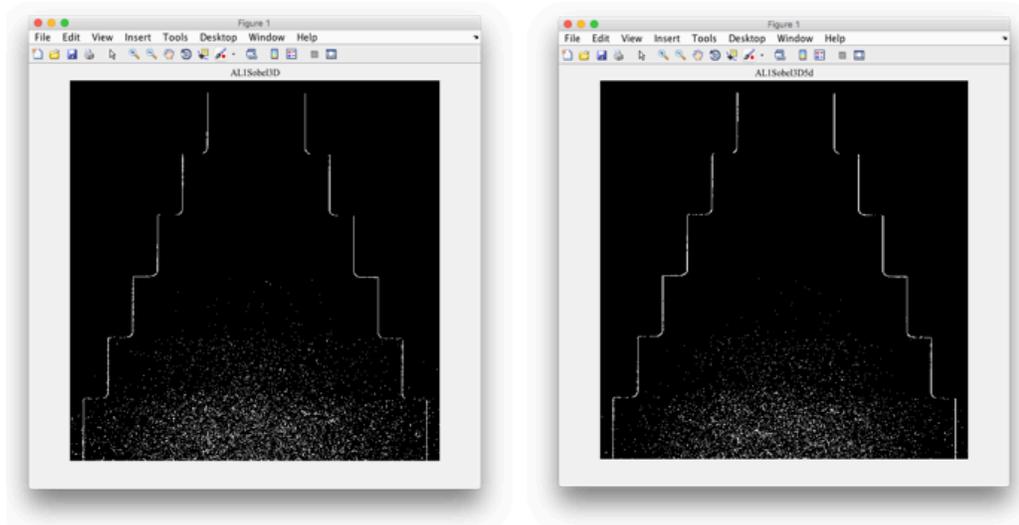


Fig. 20 Sobel in 3 direzioni e Sobel in 5 direzioni per l'alluminio nella prima sperimentazione

5.3.4 Algoritmo di Canny

L'ultimo metodo di segmentazione utilizzato è l'algoritmo di Canny illustrato in 4.3. Come il precedente anch'esso si basa sulla discontinuità dei valori di grigio ed evidenzia i bordi dell'oggetto segmentato.

$$[e, thresh] = \text{canny}(im, \text{sigma}, \text{threshold})$$

L'algoritmo fornisce in uscita una matrice logica 3D rappresentante i contorni dell'oggetto. Lo script richiede in ingresso la matrice 3D da segmentare e altri due parametri: il primo rappresenta il parametro di sfocatura per la maschera gaussiana, nel caso 3D può essere definito come un vettore di tre coefficienti differenti che porteranno ad avere una sfocatura differente lungo le tre direzioni; il secondo invece è un vettore composto dalle due soglie da utilizzare. Per questa segmentazione, dato il numero elevato di operazioni da svolgere su un gran quantitativo di dati, si è reso necessario suddividere il modello in parti da analizzare in maniera distinta.

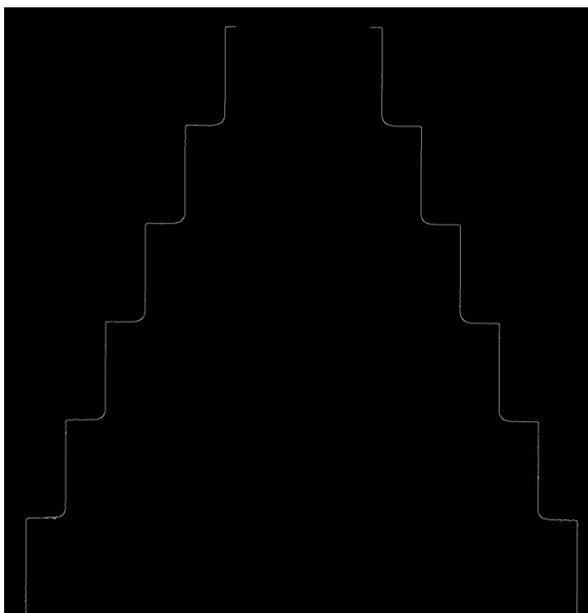


Fig. 21 Campione di alluminio segmentato con l'algoritmo di Canny nella prima sperimentazione

La fase di scelta dei parametri da utilizzare ha richiesto un certo numero di prove soprattutto per quanto riguarda il dato relativo al valore sigma da utilizzare per la fase di deblurring.

In tabella 7 e tabella 8 sono riportati i parametri utilizzati per la segmentazione, nella prima sperimentazione nella seconda sperimentazione.

Tabella 8 Parametri utilizzati nello script canny.m nella prima sperimentazione

Materiale	Sigma	Soglie
Al	[1.2 1.2 1.2]	[0.4 0.6]
Ti	[1.2 1.2 1.2]	[0.3 0.7]

Tabella 9 Parametri utilizzati nello script canny.m
nella seconda sperimentazione

Materiale	# Scansione	Sigma	Soglie
Al	1 2 3 4 5 6 7 8	[1.2 1.2 1.2]	[0.4 0.6]
Ti	1 2 5 6	[1.2 1.2 1.2]	[0.2 0.6]
Ti	3 4 7 8	[1.2 1.2 1.2]	[0.3 0.7]

5.4 Esportazione Modelli

Dopo aver segmentato i campioni e raccolto i dati 3D le matrici vanno esportate in modo da consentire la rilevazione di misure mediante programmi esterni.

Esistono due approcci per esportare i modelli:

- esportazione nuvola di punti;
- esportazione delle singole immagini segmentate.

Dalla versione R2015a Matlab è un grado di gestire e creare nuvole di punti. Per esportare i modelli segmentati come nuvole di punti è quindi sufficiente utilizzare in sequenza i comandi `pointCloud` e `pcwrite`.

Il primo crea una variabile tipo “nuvola” a partire dalla matrice 3D, mentre il secondo provvede a salvare l’oggetto in un file PLY compatibile con la maggior parte dei software di elaborazione di nuvole di punti.

Dal file PLY è possibile ricostruire la mesh dell’oggetto con le tecniche del reverse modeling che non saranno trattate qui dato che esulano dagli obiettivi di questa tesi.

Per l’esportazione delle immagini segmentate è stato creato lo script `espimm.m`, il principio di base del funzionamento è il medesimo di quello utilizzato nello script di acquisizione. L’unica differenza sta nel fatto che, grazie all’utilizzo della funzione `squeeze`, può sezionare l’oggetto in ognuna delle tre dimensioni e esportare le immagini rappresentanti le fette lungo la direzione corrispondente.

```
espimm(matrice3D, nomefile, est, dir)
```

Lo script ha come argomenti la matrice 3D, il nome del file, l'estensione con cui lo si vuole salvare e la direzione lungo il quale si vuole sezionare il modello.

5.5 Dati sperimentali

Le misurazioni sono state effettuate con l'ausilio del software efX-View. Mediante questo software è possibile impostare le dimensioni del pixel, tracciare le distanze da misurare e ottenere direttamente il valore della misura come mostrato in figura 25.

I risultati ottenuti sono stati inseriti in Minitab e analizzati.

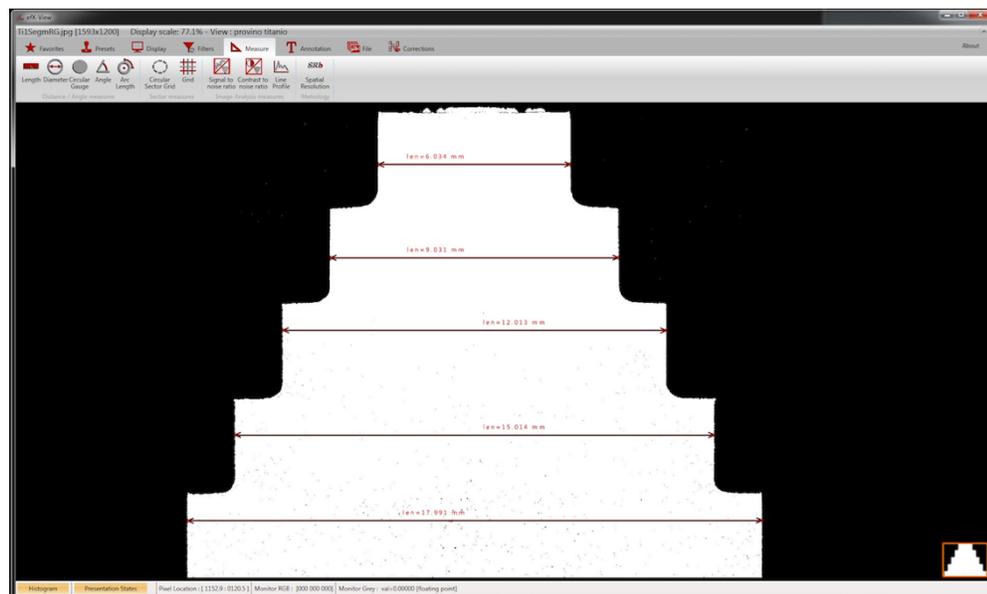


Fig. 22 Screenshot software efX-View

Dai report delle scansioni si possono ottenere le informazioni relative alla dimensione dei voxel per ogni scansione. Nella prima sperimentazione i voxel misurano $22.1\mu\text{m}$ nel caso dell'alluminio e $12.4\mu\text{m}$ nel caso del titanio. Nella seconda sperimentazione le dimensioni del voxel sono di $22,06\mu\text{m}$ per l'alluminio e $13,33\mu\text{m}$ per il titanio.

I dati sperimentali raccolti sono interamente riportati in appendice C.

5.5.1 Dati sperimentali sulla ripetibilità

Alluminio

Una volta raccolti i dati si può effettuare l'analisi utilizzando il software Minitab. Una prima analisi consiste nel tracciare il main effect plot che permette di confrontare l'influenza dell'algoritmo utilizzato per la segmentazione e quella dei diversi diametri sul risultato della misura.

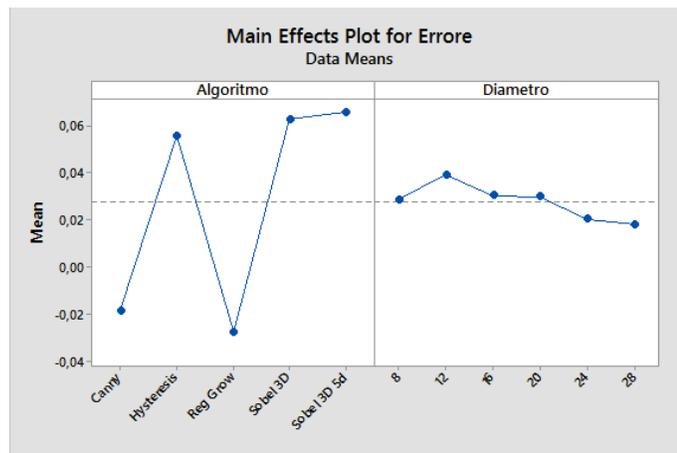


Fig. 23 Influenza degli algoritmi e dei diametri sull'errore per l'alluminio nel primo esperimento

Dall'analisi del grafico rappresentato in figura 23 si può dedurre che gli algoritmi di segmentazione influenzano in maniera maggiore la misura rispetto ai diametri.

La seconda analisi è stata effettuata utilizzando lo strumento interaction plot, questo strumento grafico evidenzia le eventuali interazioni tra i differenti diametri e gli algoritmi utilizzati.

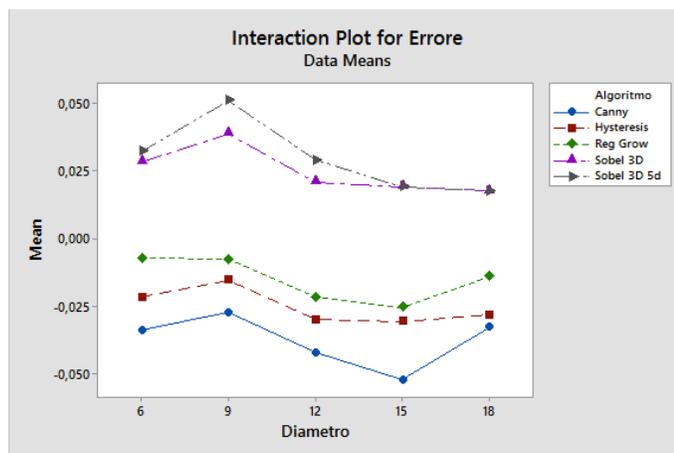


Fig. 24 Interaction plot per l'alluminio primo esperimento

Il grafico in figura 24 mostra come le linee rappresentanti i vari algoritmi siano quasi parallele tra loro. Questo indica che non ci sono interazioni rilevanti tra i differenti diametri e i vari algoritmi.

I dati sono stati poi testati con il general linear model (ANOVA). Da una prima analisi dei risultati del modello lineare è emersa la non normalità dei dati. La causa di questa non normalità è stata individuata nel fatto che i parametri di ricostruzione dei modelli 3D sono stati modificati ad ogni scansione. Per questo motivo il numero della scansione è stata considerata come un fattore di blocco. Il confronto tra i grafici riportati in figura 25 mostra chiaramente come l'aver considerato il numero della scansione come fattore di blocco abbia migliorato notevolmente i risultati del test di normalità, infatti il p-value è passato da un valore di 0,008 ad un valore di 0,878.

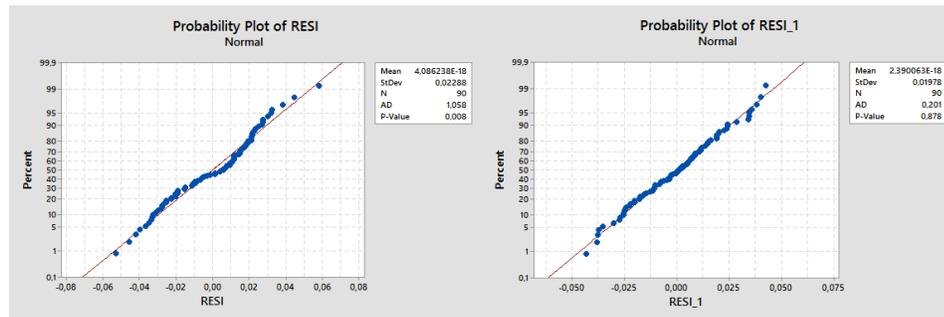


Fig. 25 Test di normalità sui residui prima (a sinistra) e dopo (a destra) aver considerato la scansione

L'analisi della varianza, i cui risultati sono mostrati in figura 26, mostra come il diametro abbia un p-value di 0,350 mentre l'interazione diametro-algoritmo abbia un p-value di 0,831. Questi dati indicano che entrambi i fattori influenzano poco la misura e quindi possono essere trascurati.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Algoritmo	4	0,156191	0,039048	50,30	0,000
Diametro	5	0,004419	0,000884	1,14	0,350
Algoritmo*Diametro	20	0,010533	0,000527	0,68	0,831
Error	60	0,046578	0,000776		
Total	89	0,217721			

Fig. 26 Risultati dell'analisi della varianza per l'alluminio primo esperimento

Conviene quindi creare un nuovo modello in cui i fattori diametro e diametro*algoritmo vengono trascurati. Il grafico in figura 27 da una panoramica della bontà del modello utilizzato. Il sotto-grafico versus fits mostra come i residui siano distribuiti in maniera normale, mentre il diagramma versus order è viziato dalla non completa casualizzazione dell'esperimento, in quanto le misure sono state fatte in maniera sequenziale.

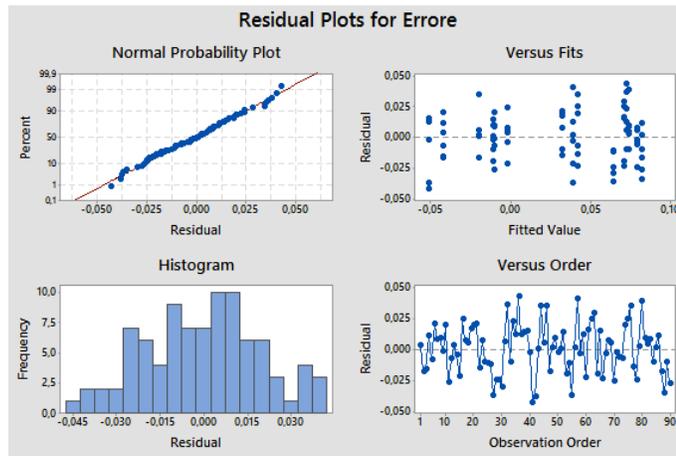


Fig. 27 Grafico riassuntivo del modello lineare per l'alluminio nel primo esperimento

L'equazione di regressione mostrata in figura 28 rappresenta il modello d'influenza dei vari fattori sul risultato della misura.

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Errore} = & 0,02770 - 0,04622 \text{ Algoritmo_Canny} + 0,02813 \text{ Algoritmo_Hysteresis} \\ & - 0,05526 \text{ Algoritmo_Reg Grow} + 0,03518 \text{ Algoritmo_Sobel 3D} + 0,03818 \text{ Algoritmo_Sobel} \\ & 3\text{D 5d} + 0,01608 \text{ Scansione_Al 3} - 0,02390 \text{ Scansione_Al1} + 0,00781 \text{ Scansione_Al2} \end{aligned}$$

Fig. 28 equazione di regressione per l'alluminio nel primo esperimento

Dall'analisi dell'equazione di regressione è possibile valutare l'errore sistematico dovuto all'utilizzo dei vari algoritmi sommando la costante con il coefficiente di ogni algoritmo. I risultati sono riportati in tabella 10

Tabella 10 Errore sistematico dei vari algoritmi nell'alluminio primo esperimento

	Rip Al
Canny	-0,01852 mm
Hysteresis	0,05583 mm
Region Growing	-0,02756 mm
Sobel 3D	0,06288 mm
Sobel 3D 5d	0,06588 mm

L'algoritmo che introduce il minor errore sistematico è l'algoritmo di Canny, come è ben visibile in figura 29.

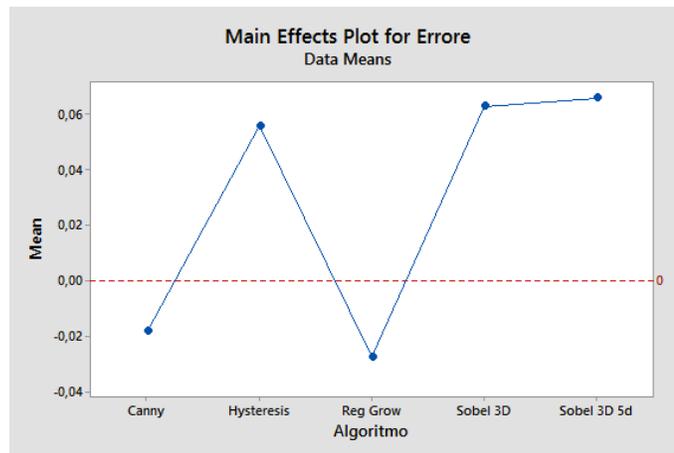


Fig. 29 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero, per l'alluminio nel primo esperimento

Titanio

Come mostrato nel main effects plot in figura 30, anche nel caso del titanio la scelta dell'algoritmo influenza l'errore in maniera decisamente più significativa rispetto ai differenti valori dei diametri.

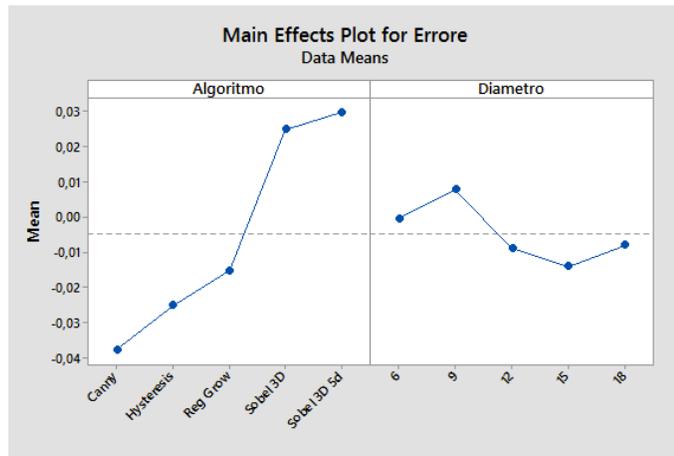


Fig. 30 Influenza degli algoritmi e dei diametri sull'errore per il titanio nel primo esperimento

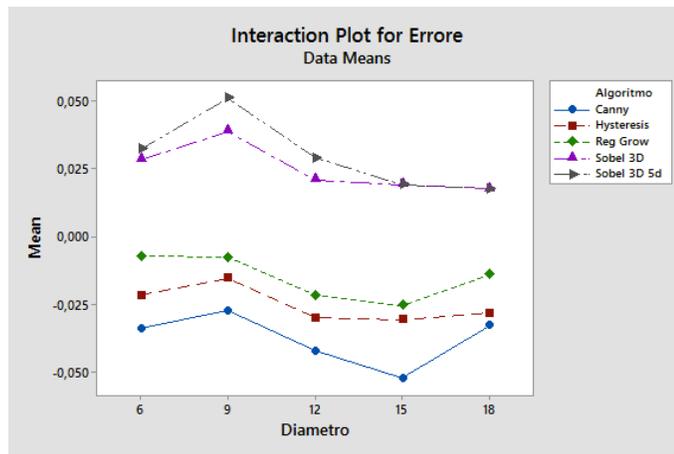


Fig. 31 Interaction plot per il titanio nel primo esperimento

L'interaction plot in figura 30 mostra il quasi parallelismo delle linee rappresentanti i vari algoritmi, questo indica che anche in questo caso non ci sono interazioni significative tra i differenti diametri e i vari algoritmi.

In questo caso, avendo già valutato la rilevanza del numero della scansione, il modello è stato creato considerando da subito anche questo fattore in modo da avere un buon risultato nel test di normalità.

La tabella riportata in figura 32 mostra come, anche nel caso del campione in titanio, sia il diametro sia l'interazione diametro-algoritmo risultano essere trascurabili al fine della creazione del modello. Entrambi infatti hanno un p-value abbondantemente superiore alla soglia standard del 5%.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Diametro	4	0,004355	0,001089	1,95	0,118
Algoritmo	4	0,055674	0,013919	24,88	0,000
Scansione	2	0,005591	0,002795	5,00	0,011
Diametro*Algoritmo	16	0,001175	0,000073	0,13	1,000
Error	48	0,026850	0,000559		
Total	74	0,093645			

Fig. 32 Risultati dell'analisi della varianza per il titanio nel primo esperimento

Il grafico riassuntivo del nuovo modello, creato trascurando i due fattori d'influenza, è rappresentato in figura 33. Come nel caso dell'alluminio i residui sono distribuiti in maniera abbastanza normale, mentre il diagramma versus order è viziato dalla non completa casualizzazione dell'esperimento.

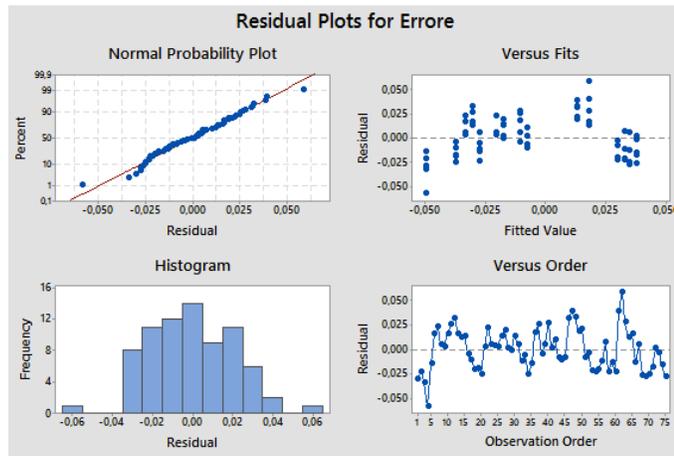


Fig. 33 Grafico riassuntivo del modello lineare per il titanio nel primo esperimento

Dall'analisi dell'equazione di regressione si ottiene la valutazione dell'errore sistematico dovuto ai vari algoritmi.

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{Errore} = & -0,00469 - 0,03316 \text{ Algoritmo_Canny} - 0,02056 \text{ Algoritmo_Hysteresis} \\ & - 0,01056 \text{ Algoritmo_Reg Grow} + 0,02971 \text{ Algoritmo_Sobel 3D} + 0,03457 \text{ Algoritmo_Sobel} \\ & \text{3D 5d} - 0,01209 \text{ Scansione_Ti 1} + 0,00459 \text{ Scansione_Ti 2} + 0,00751 \text{ Scansione_Ti 3} \end{aligned}$$

Fig. 34 equazione di regressione per il titanio nel primo esperimento

Tabella 11 Errore sistematico dei vari algoritmi nel titanio primo esperimento

	Rip Ti
Canny	-0,03785 mm
Hysteresis	-0,02525 mm
Region Growing	-0,01525 mm
Sobel 3D	0,02502 mm
Sobel 3D 5d	0,02988 mm

In questo caso l' algoritmo che introduce il minor errore sistematico è l' algoritmo region growing come confermato dal grafico in figura 35.

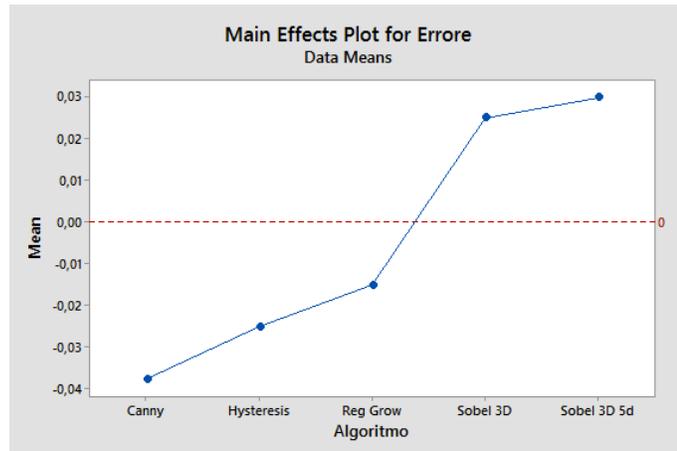


Fig. 35 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero per il titanio nel primo esperimento

5.5.2 Dati sperimentali sulla valutazione dei fattori di influenza

Alluminio

In questa sperimentazione nel main effects plot sono presenti due fattori d'influenza in più. Nello specifico i due fattori sono il livello di energia e la presenza o meno del filtro fisico.

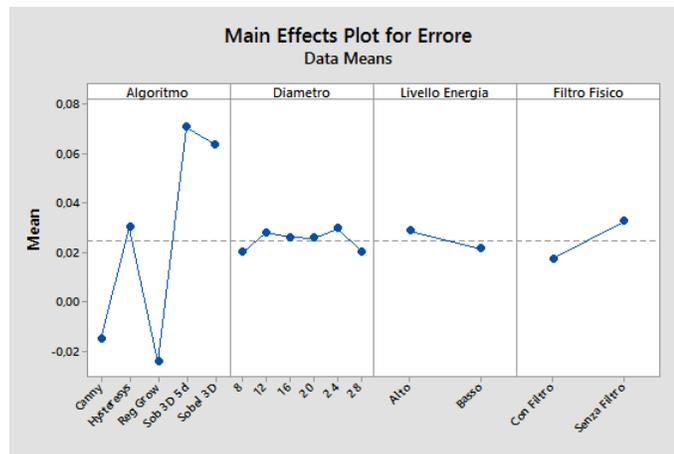


Fig. 36 Main effects plot per l'alluminio nel secondo esperimento

Come mostrato in figura 36 anche in questo caso il fattore che influenza in maniera maggiore la misura è la scelta dell'algoritmo di segmentazione.

L'interaction plot in questo caso, data la presenza di più di due fattori d'influenza, risulta essere un grafico composto dai sotto-grafici che mostrano le interazioni tra le varie coppie di fattori.

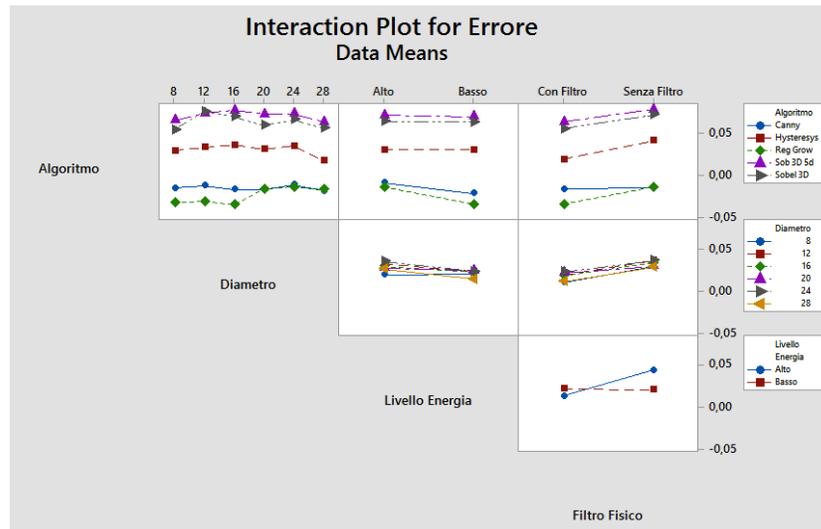


Fig. 37 Interaction plot per l'alluminio nel secondo esperimento

Analizzando il grafico si può dedurre che l'unica coppia dove è evidente un non parallelismo è la coppia Livello Energia – Filtro Fisico.

L'analisi della varianza del modello lineare, creato considerando tutti i fattori e le loro interazioni, consente di valutare l'influenza che i vari fattori hanno sulla misura permettendo di trascurare i fattori meno influenti al fine di creare un modello più snello. Il test di normalità (figura 39) mostra un buon livello di normalità dei residui del modello e restituisce un p-value di 0,459.

Dai dati restituiti da Minitab, mostrati in figura 38, si evince che si può creare un buon modello lineare semplificato considerando solo quattro fattori d'influenza: algoritmo, livello di energia, filtro fisico e l'interazione tra il livello di energia e il filtro fisico.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Algoritmo	4	0,370294	0,092574	197,21	0,000
Diametro	5	0,003199	0,000640	1,36	0,240
Livello Energia	1	0,003125	0,003125	6,66	0,011
Filtro Fisico	1	0,013650	0,013650	29,08	0,000
Algoritmo*Diametro	20	0,006730	0,000337	0,72	0,806
Algoritmo*Livello Energia	4	0,004069	0,001017	2,17	0,074
Algoritmo*Filtro Fisico	4	0,003115	0,000779	1,66	0,161
Diametro*Livello Energia	5	0,001382	0,000276	0,59	0,709
Diametro*Filtro Fisico	5	0,000720	0,000144	0,31	0,908
Livello Energia*Filtro Fisico	1	0,015360	0,015360	32,72	0,000
Error	189	0,088718	0,000469		
Lack-of-Fit	69	0,018709	0,000271	0,46	1,000
Pure Error	120	0,070009	0,000583		
Total	239	0,510363			

Fig. 38 Analisi della varianza per l'alluminio nel secondo esperimento

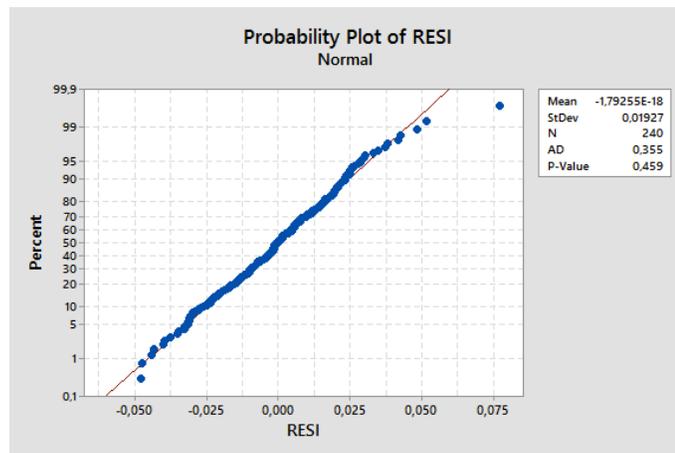


Fig. 39 Test di normalità sui residui per l'alluminio nel secondo esperimento

In figura 40 è mostrato il grafico riassuntivo del modello lineare semplificato, in cui si nota che i residui sono normali e hanno una varianza costante.

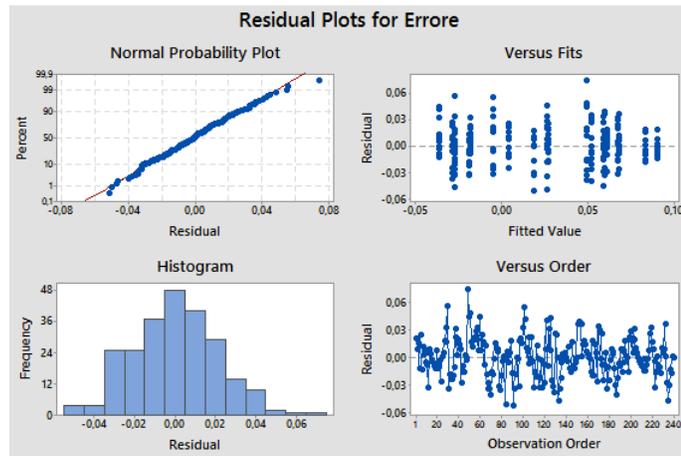


Fig. 40 Grafico riassuntivo del modello lineare per l'alluminio nel secondo esperimento

Per valutare quale algoritmo di segmentazione eserciti la minore influenza si analizza ancora una volta l'equazione di regressione del modello lineare semplificato calcolando l'errore sistematico.

Regression Equation

$$\begin{aligned}
 \text{Errore} = & 0,02497 - 0,04040 \text{ Algoritmo_Canny} + 0,00519 \text{ Algoritmo_Hysteresys} \\
 & - 0,04946 \text{ Algoritmo_Reg Grow} + 0,04590 \text{ Algoritmo_Sob 3D 5d} + 0,03877 \text{ Algoritmo_Sobel} \\
 & 3D + 0,00361 \text{ Livello Energia_Alto} - 0,00361 \text{ Livello Energia_Basso} \\
 & - 0,00754 \text{ Filtro Fisico_Con Filtro} + 0,00754 \text{ Filtro Fisico_Senza Filtro} \\
 & - 0,00800 \text{ Livello Energia*Filtro Fisico_Alto Con Filtro} \\
 & + 0,00800 \text{ Livello Energia*Filtro Fisico_Alto Senza Filtro} \\
 & + 0,00800 \text{ Livello Energia*Filtro Fisico_Basso Con Filtro} \\
 & - 0,00800 \text{ Livello Energia*Filtro Fisico_Basso Senza Filtro}
 \end{aligned}$$

Fig. 41 Equazione di regressione per l'alluminio nel secondo esperimento

L'algoritmo di segmentazione migliore risulta essere l'algoritmo di Canny, come nel caso dell'alluminio nel primo esperimento.

Tabella 12 Errore sistematico dei vari algoritmi nell'alluminio secondo esperimento

	Sper Al
Canny	-0,01543 mm
Hysteresis	0,03016 mm
Region Growing	-0,02449 mm
Sobel 3D	0,07087 mm
Sobel 3D 5d	0,06374 mm

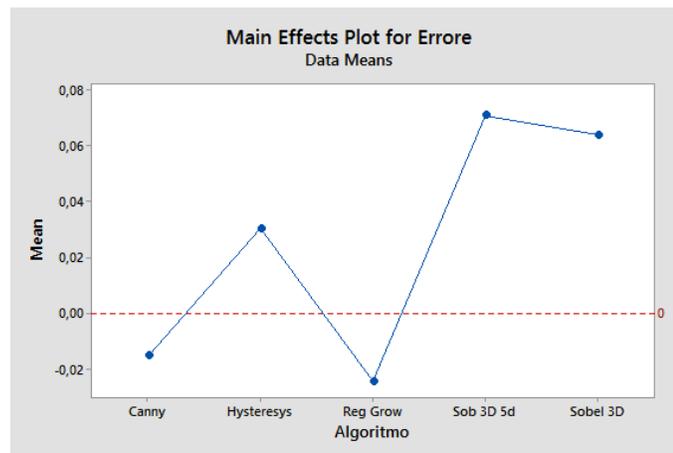


Fig. 42 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero per l'alluminio nel secondo esperimento

Titanio

Come nel caso dell'alluminio il main effects plot evidenzia la maggior influenza degli algoritmi di segmentazione rispetto agli altri fattori.

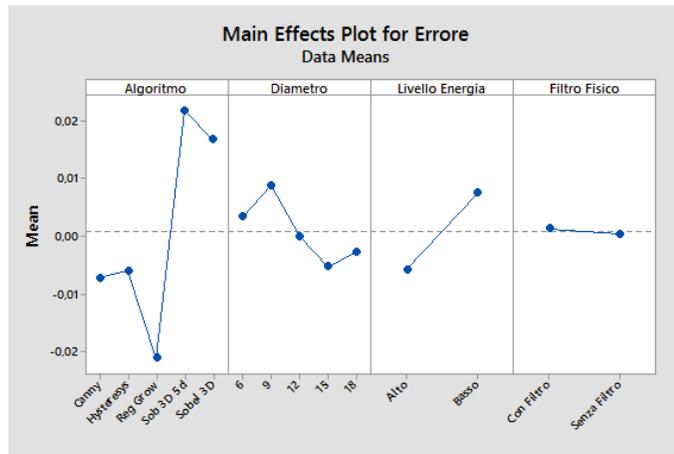


Fig. 43 Main effects plot per il titanio nel secondo esperimento

Dall'interaction plot (figura 44) sembrano esserci delle possibili interazioni tra il livello di energia e l'algoritmo di segmentazione utilizzato.

Il test di normalità sui residui del modello lineare, creato considerando tutti i fattori e le loro interazioni, fornisce una buona risposta caratterizzata da un p-value di 0,530.

Dall'analisi della varianza del modello lineare, mostrata in figura 45, si nota che è possibile costruire un modello semplificato trascurando la presenza del filtro fisico e le seguenti interazioni: algoritmo*diametro, algoritmo*filtro fisico, diametro*livello di energia, diametro*filtro fisico e livello di energia*filtro fisico.

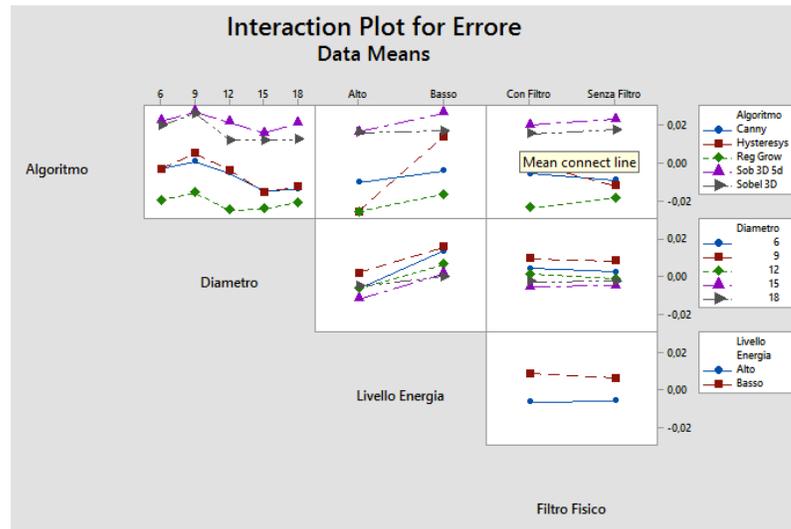


Fig. 44 Interaction plot per il titanio nel secondo esperimento

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Algorithmo	4	0,051738	0,012934	58,61	0,000
Diametro	4	0,004841	0,001210	5,48	0,000
Livello Energia	1	0,008858	0,008858	40,14	0,000
Filtro Fisico	1	0,000049	0,000049	0,22	0,638
Algorithmo*Diametro	16	0,001148	0,000072	0,33	0,994
Algorithmo*Livello Energia	4	0,009526	0,002381	10,79	0,000
Algorithmo*Filtro Fisico	4	0,002064	0,000516	2,34	0,058
Diametro*Livello Energia	4	0,001158	0,000289	1,31	0,268
Diametro*Filtro Fisico	4	0,000077	0,000019	0,09	0,986
Livello Energia*Filtro Fisico	1	0,000111	0,000111	0,50	0,479
Error	156	0,034424	0,000221		
Lack-of-Fit	56	0,014931	0,000267	1,37	0,087
Pure Error	100	0,019494	0,000195		

Fig. 45 Analisi della varianza per il titanio nel secondo esperimento

In figura 46 è mostrato il grafico riassuntivo del modello lineare semplificato, in cui si nota che i residui sono normali e hanno una varianza costante.

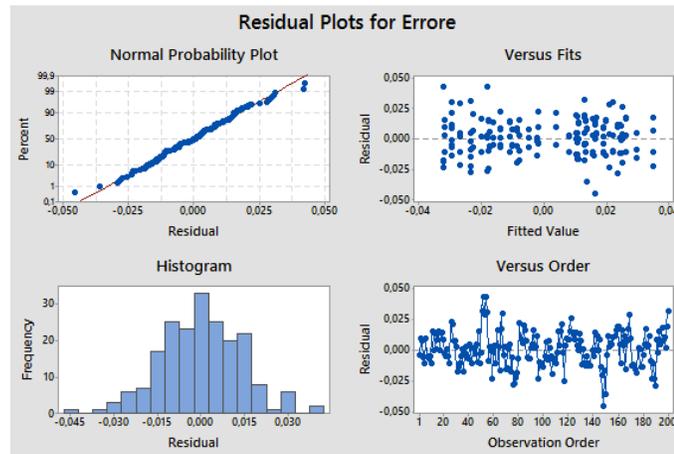


Fig. 46 Grafico riassuntivo del modello lineare per il titanio nel secondo esperimento

L'equazione di regressione in questo caso diventa:

```

Regression Equation

Errore = 0,00078 - 0,00806 Algoritmo_Canny - 0,00681 Algoritmo_Hysteresys
- 0,02207 Algoritmo_Reg Grow + 0,02098 Algoritmo_Sob 3D 5d + 0,01596 Algoritmo_Sobel
3D + 0,00249 Diametro_6 + 0,00802 Diametro_9 - 0,00084 Diametro_12
- 0,00608 Diametro_15 - 0,00358 Diametro_18 - 0,00665 Livello Energia_Alto
+ 0,00665 Livello Energia_Basso + 0,00360 Algoritmo*Livello Energia_Canny Alto
- 0,00360 Algoritmo*Livello Energia_Canny Basso
- 0,01340 Algoritmo*Livello Energia_Hysteresys Alto
+ 0,01340 Algoritmo*Livello Energia_Hysteresys Basso
+ 0,00201 Algoritmo*Livello Energia_Reg Grow Alto
- 0,00201 Algoritmo*Livello Energia_Reg Grow Basso
+ 0,00150 Algoritmo*Livello Energia_Sob 3D 5d Alto
- 0,00150 Algoritmo*Livello Energia_Sob 3D 5d Basso
+ 0,00628 Algoritmo*Livello Energia_Sobel 3D Alto
- 0,00628 Algoritmo*Livello Energia_Sobel 3D Basso

```

Fig. 47 Equazione di regressione per il titanio nel secondo esperimento

Dalla valutazione dell'equazione di regressione si ottiene la tabella degli errori sistematici. In questo caso il miglior algoritmo di segmentazione è quello basato sull'hysteresis thresholding.

Tabella 13 Errore sistematico dei vari algoritmi nel titanio secondo esperimento

	Sper Ti
Canny	-0,00728 mm
Hysteresis	-0,00603 mm
Region Growing	-0,02129 mm
Sobel 3D	0,02176 mm
Sobel 3D 5d	0,01674 mm

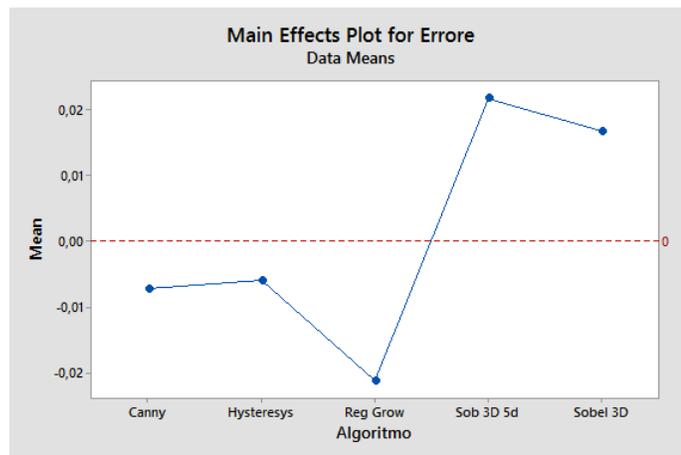


Fig. 48 Main effect plot del solo algoritmo rispetto allo zero per il titanio nel secondo esperimento

6 Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono state analizzate le prestazioni di alcuni algoritmi di segmentazione e l'influenza che alcuni parametri operativi possono avere sulla misura finale.

In tabella 14 è mostrata una panoramica dei risultati ottenuti nei vari esperimenti. Analizzando i dati è evidente che non esiste un algoritmo di segmentazione migliore in ogni situazione.

Tabella 14 Errori sistematici legati agli algoritmi

	Rip Al	Rip Ti	Sper Al	Sper Ti
Canny	-0,01852 mm	-0,03785 mm	-0,01543 mm	-0,00728 mm
Hysteresis	0,05583 mm	-0,02525 mm	0,03016 mm	-0,00603 mm
Reg Growing	-0,02756 mm	-0,01525 mm	-0,02449 mm	-0,02129 mm
Sobel 3D	0,06288 mm	0,02502 mm	0,07087 mm	0,02176 mm
Sobel 3D 5d	0,06588 mm	0,02988 mm	0,06374 mm	0,01674 mm

Nella prima sperimentazione si è visto che gli algoritmi di segmentazione influenzano la bontà della misura in maniera maggiore rispetto al diametro da misurare.

Nella sperimentazione sulla ripetibilità nel caso dell'alluminio l'algoritmo che si è rivelato più efficace è l'algoritmo di Canny, mentre nel caso del titanio il più efficace è risultato essere l'algoritmo region growing.

Nella seconda sperimentazione sono stati valutati gli effetti del livello energetico e della presenza di un filtro fisico sui risultati della scansione.

La presenza del filtro fisico risulta essere influente solo nel caso dell'alluminio. Tale condizione può essere interpretata in base al materiale del filtro utilizzato. Nel caso

dell'alluminio, il filtro è anch'esso in alluminio, garantendo la corretta soppressione dei raggi X morbidi. Nel caso del titanio il filtro è in rame, con un assorbimento diverso.

Nella seconda sperimentazione il miglior algoritmo di segmentazione è l'algoritmo di Canny nel caso dell'alluminio, mentre nel caso del titanio il più efficace risulta essere l'algoritmo basato sull'Hysteresis Thresholding.

In generale dai risultati ottenuti emerge come gli algoritmi di segmentazione Canny e region growing tendono a sottostimare la misura, mentre i due algoritmi basati sull'operatore di Sobel tridimensionali tendono a sovrastimare la misura stessa.

In caso di scansioni rumorose, come evidenziato in figura 20, è opportuno evitare di utilizzare algoritmi basati sul calcolo del gradiente se non provvisti di una fase di smoothing. In questo modo è possibile evitare di avere valori di gradiente elevato in corrispondenza di punti che non appartengono alla superficie dell'oggetto.

Gli algoritmi Canny e region growing richiedono grandi sforzi computazionali e una grande allocazione di memoria dinamica. Per questo motivo infatti sono stati applicati a piccole porzioni del campione, come già discusso nel capitolo 5.

Questo studio ha dimostrato che non esiste un algoritmo di segmentazione in grado di offrire le prestazioni migliori in ogni condizione ma dipende dal caso in esame.

Un interessante sviluppo futuro potrebbe essere l'estensione di questo studio al caso di oggetti multi-materiale, in cui i coefficienti di attenuazione μ sono più vicini tra loro rispetto al caso aria-materiale. Questo porterà ad un modello composto da voxel contenenti valori di grigio più simili tra loro rendendo più complicato il lavoro degli algoritmi di segmentazione.

A Campioni utilizzati

Progetto campioni

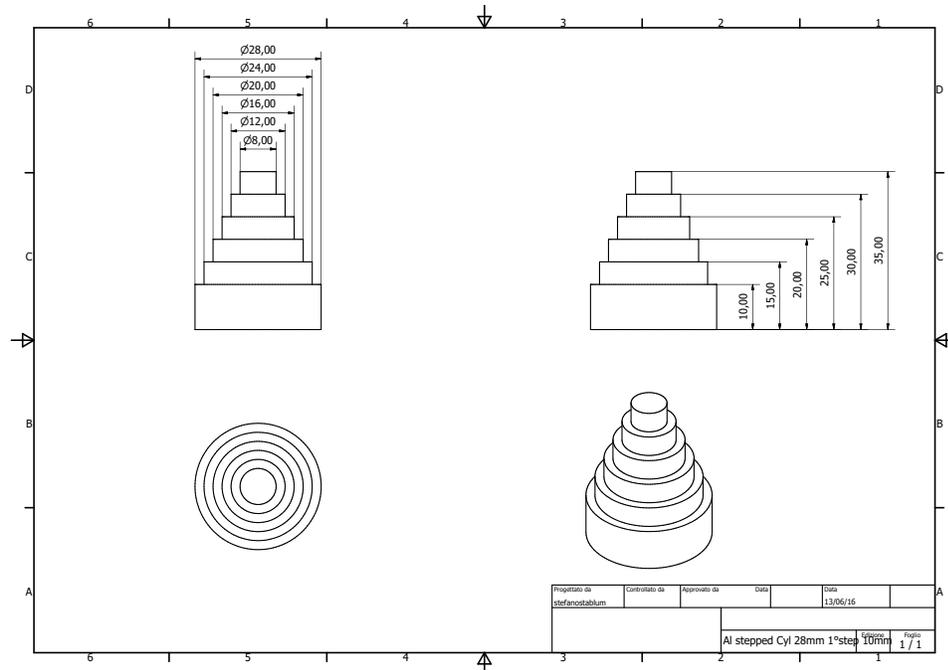


Fig. 49 Cartiglio provino in alluminio.

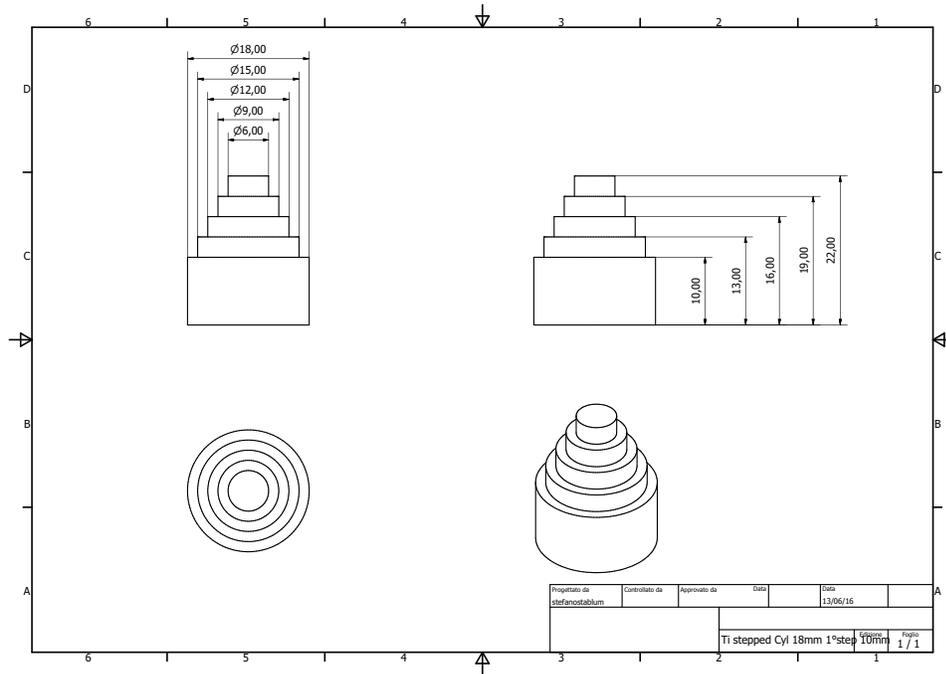


Fig. 50 Cartiglio provino in titanio.

Risultati di taratura

Tabella 15 Taratura campione in alluminio

Caratteristica geometrica	Valore nominale (mm)	Valore tarato (mm)	Incertezza estesa (mm)	fattore di copertura
Diameter_Cylinder 28	28	27.9795	0.2	2
Diameter_Cylinder 24	24	23.9847	0.2	2
Diameter_Cylinder 20	20	19.9886	0.2	2
Diameter_Cylinder 16	16	15.9928	0.2	2
Diameter_Cylinder 12	12	11.9942	0.3	2
Diameter_Cylinder 8	8	7.9958	0.4	2
Cylindricity 8	N/A	0.0044	1.0	2
Cylindricity 12	N/A	0.0046	0.8	2
Cylindricity 16	N/A	0.0049	0.9	2
Cylindricity 20	N/A	0.0045	0.5	2
Cylindricity 24	N/A	0.0046	0.6	2
Cylindricity 28	N/A	0.0069	0.6	2
Cartesian Distance 5	5	4.9978	1.3	2
Cartesian Distance 10	5	4.9975	1.4	2
Cartesian Distance 15	5	4.9973	1.1	2
Cartesian Distance 20	5	4.9956	0.9	2
Cartesian Distance 25	5	4.9987	0.8	2

Tabella 16 Taratura campione in titanio

Caratteristica geometrica	Valore nominale (mm)	Valore tarato (mm)	Incertezza estesa (mm)	fattore di copertura
Diameter_Cylinder 18	18	18.0584	0.2	2
Diameter_Cylinder 15	15	15.0704	0.9	2
Diameter_Cylinder 12	12	12.0707	0.2	2
Diameter_Cylinder 9	9	9.0798	0.2	2
Diameter_Cylinder 6	6	6.0760	0.4	2
Cylindricity 6	N/A	0.0101	0.3	2
Cylindricity 9	N/A	0.0172	0.4	2
Cylindricity 12	N/A	0.0133	0.8	2
Cylindricity 15	N/A	0.033	3.4	2
Cylindricity 18	N/A	0.0129	0.6	2
Cartesian Distance 3	3	2.990	1.4	2
Cartesian Distance 6	3	2.9975	0.4	2
Cartesian Distance 9	3	2.9954	0.8	2
Cartesian Distance 12	3	2.9903	0.3	2

B Codice Matlab

Hysteresis Threshold

```
function [M]=hys3D(im,lt,ht,conn)

% funzione per l'applicazione di una soglia con isteresi per
imm. 2D o 3D
% im= immagine o matrice 3D
% lt= soglia inferiore
% ht= soglia maggiore
% conn= regioni connesse, val ammissibili 2D(4,8)
3D(6,18,26)

% controllo arg in in
if nargin<4
    disp('numero di argomenti errato')
    return;
else
% applicazione soglia con isteresi
sopralt=im>lt; % punti maggiori
lowt

posht=sub2ind(size(sopralt),find(im>ht)); % posizione dei
punti maggiori di higt

M=imfill(~sopralt,posht,conn); % maschera delle regioni
connesse

M=M & sopralt;
end
```

Sobel 3D (direzioni x y z)

```
% 3x3 Sobel edge detection for 3D matrix.
% return a matrix where the edges are detected w.r.t. threshold value.
function [edgematrix,E] = sobel3D(originalMatrix, threshold)
%#codegen

% Sobel Operator Definition

% X direction

Kx=[-1 0 1 ; -2 0 2; -1 0 1 ];
Kx(:,:,2)=Kx(:,:,1)*2;
Kx(:,:,3)=Kx(:,:,1);

% Y direction

Ky=Kx(:,:,1)';
Ky(:,:,2)=Kx(:,:,2)';
Ky(:,:,3)=Kx(:,:,3)';

% Z direction

Kz=[-1 -2 -1 ; -2 -4 -2; -1 -2 -1 ];
Kz(:,:,2)=[0 0 0 ;0 0 0 ;0 0 0 ];
Kz(:,:,3)=-Kz(:,:,1);

% Convolution operators

X=convn(originalMatrix,Kx, 'same');
Y=convn(originalMatrix,Ky, 'same');
Z=convn(originalMatrix,Kz, 'same');

% Total gradient Magnitude

E = sqrt(X.*X + Y.*Y + Z.*Z);

% Thresholding

edgematrix =(E > threshold);
```

Sobel 3D (direzioni x y z 45° 135°)

```
% 3x3 Sobel edge detection for 3D matrix in 5 directions
% return a matrix where the edges are detected w.r.t. threshold value.
function [edgematrix,E] = sobel3Dpiudiag(originalMatrix, threshold)
```

```

% Sobel Operator Definition

% X direction

Kx=[-1 0 1 ; -2 0 2; -1 0 1 ];
Kx(:,:,2)=Kx(:,:,1)*2;
Kx(:,:,3)=Kx(:,:,1);

% Y direction

Ky=Kx(:,:,1)';
Ky(:,:,2)=Kx(:,:,2)';
Ky(:,:,3)=Kx(:,:,3)';

% Z direction

Kz=[-1 -2 -1 ; -2 -4 -2; -1 -2 -1 ];
Kz(:,:,2)=[0 0 0 ;0 0 0 ;0 0 0 ];
Kz(:,:,3)=-Kz(:,:,1);

% diag direction (45°)

K45=[-2 -1 0 ;-1 0 1 ;0 1 2 ];
K45(:,:,2)=K45(:,:,1)*2;
K45(:,:,3)=K45(:,:,1);

% diag direction (135°)

K135=[0 -1 -2 ;1 0 -1 ;2 1 0 ];
K135(:,:,2)=K135(:,:,1)*2;
K135(:,:,3)=K135(:,:,1);

% Convolution operators

X=convn(originalMatrix,Kx, 'same');
Y=convn(originalMatrix,Ky, 'same');
Z=convn(originalMatrix,Kz, 'same');
D45=convn(originalMatrix,K45, 'same');
D135=convn(originalMatrix,K135, 'same');

% Total gradient Magnitude

E = sqrt(X.*X + Y.*Y + Z.*Z + D45.*D45 + D135.*D135);

% Thresholding

edgmatrix =(E > threshold);

```


C Dati sperimentali

Dati prima sperimentazione

Alluminio

Val Mis CMM	Valori Mis	Errore	Algoritmo	Diametro	Scansione
7,9958	7,956	-0,0398	Canny	8	AI1
11,9942	11,934	-0,0602	Canny	12	AI1
15,9928	15,934	-0,0588	Canny	16	AI1
19,9886	19,9567	-0,0319	Canny	20	AI1
23,9847	23,934	-0,0507	Canny	24	AI1
27,9796	27,957	-0,0226	Canny	28	AI1
7,9958	7,993	-0,0028	Canny	8	AI2
11,9942	11,992	-0,0022	Canny	12	AI2
15,9928	15,98	-0,0128	Canny	16	AI2
19,9886	19,997	0,0084	Canny	20	AI2
23,9847	23,947	-0,0377	Canny	24	AI2
27,9796	27,961	-0,0186	Canny	28	AI2
7,9958	7,996	0,0002	Canny	8	AI 3
11,9942	11,987	-0,0072	Canny	12	AI 3
15,9928	15,968	-0,0248	Canny	16	AI 3
19,9886	20,01	0,0214	Canny	20	AI 3
23,9847	23,989	0,0043	Canny	24	AI 3
27,9796	27,982	0,0024	Canny	28	AI 3
7,9958	8,044	0,0482	Hysteresis	8	AI1
11,9942	12,045	0,0508	Hysteresis	12	AI1
15,9928	16,045	0,0522	Hysteresis	16	AI1
19,9886	20,005	0,0164	Hysteresis	20	AI1
23,9847	24,023	0,0383	Hysteresis	24	AI1
27,9796	28,001	0,0214	Hysteresis	28	AI1
7,9958	8,048	0,0522	Hysteresis	8	AI2
11,9942	12,045	0,0508	Hysteresis	12	AI2
15,9928	16,019	0,0262	Hysteresis	16	AI2
19,9886	20,027	0,0384	Hysteresis	20	AI2
23,9847	24,023	0,0383	Hysteresis	24	AI2
27,9796	28,013	0,0334	Hysteresis	28	AI2
7,9958	8,073	0,0772	Hysteresis	8	AI 3
11,9942	12,102	0,1078	Hysteresis	12	AI 3
15,9928	16,054	0,0612	Hysteresis	16	AI 3
19,9886	20,083	0,0944	Hysteresis	20	AI 3
23,9847	24,068	0,0833	Hysteresis	24	AI 3
27,9796	28,094	0,1144	Hysteresis	28	AI 3
7,9958	7,956	-0,0398	Reg Grow	8	AI1
11,9942	11,956	-0,0382	Reg Grow	12	AI1
15,9928	15,956	-0,0368	Reg Grow	16	AI1
19,9886	19,934	-0,0546	Reg Grow	20	AI1

23,9847	23,89	-0,0947	Reg Grow	24	AI1
27,9796	27,89	-0,0896	Reg Grow	28	AI1
7,9958	7,976	-0,0198	Reg Grow	8	AI2
11,9942	12,009	0,0148	Reg Grow	12	AI2
15,9928	15,978	-0,0148	Reg Grow	16	AI2
19,9886	20,003	0,0144	Reg Grow	20	AI2
23,9847	23,947	-0,0377	Reg Grow	24	AI2
27,9796	27,961	-0,0186	Reg Grow	28	AI2
7,9958	7,993	-0,0028	Reg Grow	8	AI 3
11,9942	11,98	-0,0142	Reg Grow	12	AI 3
15,9928	15,981	-0,0118	Reg Grow	16	AI 3
19,9886	19,991	0,0024	Reg Grow	20	AI 3
23,9847	23,953	-0,0317	Reg Grow	24	AI 3
27,9796	27,957	-0,0226	Reg Grow	28	AI 3
7,9958	7,997	0,0012	Sobel 3D	8	AI1
11,9942	12,034	0,0398	Sobel 3D	12	AI1
15,9928	16,072	0,0792	Sobel 3D	16	AI1
19,9886	20,024	0,0354	Sobel 3D	20	AI1
23,9847	24,035	0,0503	Sobel 3D	24	AI1
27,9796	27,996	0,0164	Sobel 3D	28	AI1
7,9958	8,082	0,0862	Sobel 3D	8	AI2
11,9942	12,089	0,0948	Sobel 3D	12	AI2
15,9928	16,092	0,0992	Sobel 3D	16	AI2
19,9886	20,039	0,0504	Sobel 3D	20	AI2
23,9847	24,07	0,0853	Sobel 3D	24	AI2
27,9796	28,026	0,0464	Sobel 3D	28	AI2
7,9958	8,071	0,0752	Sobel 3D	8	AI 3
11,9942	12,08	0,0858	Sobel 3D	12	AI 3
15,9928	16,077	0,0842	Sobel 3D	16	AI 3
19,9886	20,042	0,0534	Sobel 3D	20	AI 3
23,9847	24,061	0,0763	Sobel 3D	24	AI 3
27,9796	28,052	0,0724	Sobel 3D	28	AI 3
7,9958	8,03	0,0342	Sobel 3D 5d	8	AI1
11,9942	12,055	0,0608	Sobel 3D 5d	12	AI1
15,9928	16,059	0,0662	Sobel 3D 5d	16	AI1
19,9886	20,065	0,0764	Sobel 3D 5d	20	AI1
23,9847	24,012	0,0273	Sobel 3D 5d	24	AI1
27,9796	27,997	0,0174	Sobel 3D 5d	28	AI1
7,9958	8,071	0,0752	Sobel 3D 5d	8	AI2
11,9942	12,106	0,1118	Sobel 3D 5d	12	AI2
15,9928	16,075	0,0822	Sobel 3D 5d	16	AI2
19,9886	20,066	0,0774	Sobel 3D 5d	20	AI2
23,9847	24,066	0,0813	Sobel 3D 5d	24	AI2
27,9796	28,043	0,0634	Sobel 3D 5d	28	AI2
7,9958	8,079	0,0832	Sobel 3D 5d	8	AI 3
11,9942	12,087	0,0928	Sobel 3D 5d	12	AI 3
15,9928	16,057	0,0642	Sobel 3D 5d	16	AI 3
19,9886	20,035	0,0464	Sobel 3D 5d	20	AI 3
23,9847	24,056	0,0713	Sobel 3D 5d	24	AI 3
27,9796	28,034	0,0544	Sobel 3D 5d	28	AI 3

Titanio

Val Mis CMM	Valori Mis	Errore	Algoritmo	Diametro	Scansione
6,076	5,996	-0,08	Canny	6	Ti 1
9,0798	9,007	-0,0728	Canny	9	Ti 1
12,0707	11,987	-0,0837	Canny	12	Ti 1
15,0704	14,962	-0,1084	Canny	15	Ti 1
18,054	17,989	-0,065	Canny	18	Ti 1
6,076	6,059	-0,017	Canny	6	Ti 2
9,0798	9,069	-0,0108	Canny	9	Ti 2
12,0707	12,042	-0,0287	Canny	12	Ti 2
15,0704	15,04	-0,0304	Canny	15	Ti 2
18,054	18,037	-0,017	Canny	18	Ti 2
6,076	6,071	-0,005	Canny	6	Ti 3
9,0798	9,081	0,0012	Canny	9	Ti 3
12,0707	12,056	-0,0147	Canny	12	Ti 3
15,0704	15,052	-0,0184	Canny	15	Ti 3
18,054	18,037	-0,017	Canny	18	Ti 3
6,076	6,034	-0,042	Hysteresis	6	Ti 1
9,0798	9,031	-0,0488	Hysteresis	9	Ti 1
12,0707	12,013	-0,0577	Hysteresis	12	Ti 1
15,0704	15,014	-0,0564	Hysteresis	15	Ti 1
18,054	17,991	-0,063	Hysteresis	18	Ti 1
6,076	6,058	-0,018	Hysteresis	6	Ti 2
9,0798	9,081	0,0012	Hysteresis	9	Ti 2
12,0707	12,055	-0,0157	Hysteresis	12	Ti 2
15,0704	15,053	-0,0174	Hysteresis	15	Ti 2
18,054	18,036	-0,018	Hysteresis	18	Ti 2
6,076	6,071	-0,005	Hysteresis	6	Ti 3
9,0798	9,081	0,0012	Hysteresis	9	Ti 3
12,0707	12,054	-0,0167	Hysteresis	12	Ti 3
15,0704	15,052	-0,0184	Hysteresis	15	Ti 3
18,054	18,05	-0,004	Hysteresis	18	Ti 3
6,076	6,054	-0,022	Reg Grow	6	Ti 1
9,0798	9,04	-0,0398	Reg Grow	9	Ti 1
12,0707	12,037	-0,0337	Reg Grow	12	Ti 1
15,0704	15,018	-0,0524	Reg Grow	15	Ti 1
18,054	18,012	-0,042	Reg Grow	18	Ti 1
6,076	6,082	0,006	Reg Grow	6	Ti 2
9,0798	9,094	0,0142	Reg Grow	9	Ti 2
12,0707	12,055	-0,0157	Reg Grow	12	Ti 2
15,0704	15,065	-0,0054	Reg Grow	15	Ti 2
18,054	18,07	0,016	Reg Grow	18	Ti 2
6,076	6,07	-0,006	Reg Grow	6	Ti 3
9,0798	9,082	0,0022	Reg Grow	9	Ti 3
12,0707	12,055	-0,0157	Reg Grow	12	Ti 3
15,0704	15,052	-0,0184	Reg Grow	15	Ti 3
18,054	18,038	-0,016	Reg Grow	18	Ti 3
6,076	6,12	0,044	Sobel 3D	6	Ti 1

9,0798	9,131	0,0512	Sobel 3D	9	Ti 1
12,0707	12,116	0,0453	Sobel 3D	12	Ti 1
15,0704	15,102	0,0316	Sobel 3D	15	Ti 1
18,054	18,088	0,034	Sobel 3D	18	Ti 1
6,076	6,097	0,021	Sobel 3D	6	Ti 2
9,0798	9,106	0,0262	Sobel 3D	9	Ti 2
12,0707	12,079	0,0083	Sobel 3D	12	Ti 2
15,0704	15,077	0,0066	Sobel 3D	15	Ti 2
18,054	18,063	0,009	Sobel 3D	18	Ti 2
6,076	6,096	0,02	Sobel 3D	6	Ti 3
9,0798	9,119	0,0392	Sobel 3D	9	Ti 3
12,0707	12,08	0,0093	Sobel 3D	12	Ti 3
15,0704	15,09	0,0196	Sobel 3D	15	Ti 3
18,054	18,064	0,01	Sobel 3D	18	Ti 3
6,076	6,133	0,057	Sobel 3D 5d	6	Ti 1
9,0798	9,156	0,0762	Sobel 3D 5d	9	Ti 1
12,0707	12,116	0,0453	Sobel 3D 5d	12	Ti 1
15,0704	15,1	0,0296	Sobel 3D 5d	15	Ti 1
18,054	18,088	0,034	Sobel 3D 5d	18	Ti 1
6,076	6,097	0,021	Sobel 3D 5d	6	Ti 2
9,0798	9,119	0,0392	Sobel 3D 5d	9	Ti 2
12,0707	12,078	0,0073	Sobel 3D 5d	12	Ti 2
15,0704	15,077	0,0066	Sobel 3D 5d	15	Ti 2
18,054	18,063	0,009	Sobel 3D 5d	18	Ti 2
6,076	6,095	0,019	Sobel 3D 5d	6	Ti 3
9,0798	9,118	0,0382	Sobel 3D 5d	9	Ti 3
12,0707	12,105	0,0343	Sobel 3D 5d	12	Ti 3
15,0704	15,092	0,0216	Sobel 3D 5d	15	Ti 3
18,054	18,064	0,01	Sobel 3D 5d	18	Ti 3

Dati seconda sperimentazione

Alluminio

Val Mis CMM	Valori Mis	Errore	Algoritmo	Diametro	Livello Energia	Filtro Fisico
7,9958	8,02	0,0242	Canny	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,007	0,0128	Canny	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,012	0,0192	Canny	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	19,981	-0,0076	Canny	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,013	0,0283	Canny	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	27,97	-0,0096	Canny	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	7,988	-0,0078	Canny	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	11,982	-0,0122	Canny	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	15,977	-0,0158	Canny	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	19,964	-0,0246	Canny	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	23,957	-0,0277	Canny	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	27,928	-0,0516	Canny	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	7,986	-0,0098	Canny	8	Basso	Con Filtro
11,9942	11,979	-0,0152	Canny	12	Basso	Con Filtro

15,9928	15,971	-0,0218	Canny	16	Basso	Con Filtro
19,9886	19,965	-0,0236	Canny	20	Basso	Con Filtro
23,9847	23,957	-0,0277	Canny	24	Basso	Con Filtro
27,9796	27,954	-0,0256	Canny	28	Basso	Con Filtro
7,9958	7,987	-0,0088	Canny	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,005	0,0108	Canny	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	15,985	-0,0078	Canny	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	19,983	-0,0056	Canny	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	23,985	0,0003	Canny	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	27,957	-0,0226	Canny	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	7,97	-0,0258	Canny	8	Alto	Con Filtro
11,9942	11,972	-0,0222	Canny	12	Alto	Con Filtro
15,9928	15,983	-0,0098	Canny	16	Alto	Con Filtro
19,9886	19,978	-0,0106	Canny	20	Alto	Con Filtro
23,9847	23,99	0,0053	Canny	24	Alto	Con Filtro
27,9796	28,008	0,0284	Canny	28	Alto	Con Filtro
7,9958	7,942	-0,0538	Canny	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	11,956	-0,0382	Canny	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	15,952	-0,0408	Canny	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	19,946	-0,0426	Canny	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	23,946	-0,0387	Canny	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	27,95	-0,0296	Canny	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	8,008	0,0122	Canny	8	Basso	Con Filtro
11,9942	11,997	0,0028	Canny	12	Basso	Con Filtro
15,9928	15,976	-0,0168	Canny	16	Basso	Con Filtro
19,9886	19,989	0,0004	Canny	20	Basso	Con Filtro
23,9847	23,98	-0,0047	Canny	24	Basso	Con Filtro
27,9796	27,97	-0,0096	Canny	28	Basso	Con Filtro
7,9958	7,941	-0,0548	Canny	8	Alto	Con Filtro
11,9942	11,957	-0,0372	Canny	12	Alto	Con Filtro
15,9928	15,95	-0,0428	Canny	16	Alto	Con Filtro
19,9886	19,964	-0,0246	Canny	20	Alto	Con Filtro
23,9847	23,957	-0,0277	Canny	24	Alto	Con Filtro
27,9796	27,95	-0,0296	Canny	28	Alto	Con Filtro
7,9958	8,119	0,1232	Hysteresis	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,087	0,0928	Hysteresis	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,09	0,0972	Hysteresis	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	20,054	0,0654	Hysteresis	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,045	0,0603	Hysteresis	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	28,048	0,0684	Hysteresis	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	8,044	0,0482	Hysteresis	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	12,048	0,0538	Hysteresis	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	16,051	0,0582	Hysteresis	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	20,034	0,0454	Hysteresis	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	24,018	0,0333	Hysteresis	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	28,05	0,0704	Hysteresis	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	8,03	0,0342	Hysteresis	8	Basso	Con Filtro
11,9942	12,046	0,0518	Hysteresis	12	Basso	Con Filtro
15,9928	16,037	0,0442	Hysteresis	16	Basso	Con Filtro
19,9886	20,008	0,0194	Hysteresis	20	Basso	Con Filtro
23,9847	24,024	0,0393	Hysteresis	24	Basso	Con Filtro

27,9796	27,988	0,0084	Hysteresis	28	Basso	Con Filtro
7,9958	8,017	0,0212	Hysteresis	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,009	0,0148	Hysteresis	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,008	0,0152	Hysteresis	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	19,998	0,0094	Hysteresis	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,018	0,0333	Hysteresis	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	28,011	0,0314	Hysteresis	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	8,013	0,0172	Hysteresis	8	Alto	Con Filtro
11,9942	12,028	0,0338	Hysteresis	12	Alto	Con Filtro
15,9928	16,021	0,0282	Hysteresis	16	Alto	Con Filtro
19,9886	20,016	0,0274	Hysteresis	20	Alto	Con Filtro
23,9847	24,009	0,0243	Hysteresis	24	Alto	Con Filtro
27,9796	27,966	-0,0136	Hysteresis	28	Alto	Con Filtro
7,9958	7,986	-0,0098	Hysteresis	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	12,001	0,0068	Hysteresis	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	16,015	0,0222	Hysteresis	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	20,016	0,0274	Hysteresis	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	24,01	0,0253	Hysteresis	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	27,955	-0,0246	Hysteresis	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	8,029	0,0332	Hysteresis	8	Basso	Con Filtro
11,9942	12,023	0,0288	Hysteresis	12	Basso	Con Filtro
15,9928	16,015	0,0222	Hysteresis	16	Basso	Con Filtro
19,9886	20,021	0,0324	Hysteresis	20	Basso	Con Filtro
23,9847	24,03	0,0453	Hysteresis	24	Basso	Con Filtro
27,9796	27,989	0,0094	Hysteresis	28	Basso	Con Filtro
7,9958	7,962	-0,0338	Hysteresis	8	Alto	Con Filtro
11,9942	11,979	-0,0152	Hysteresis	12	Alto	Con Filtro
15,9928	15,993	0,0002	Hysteresis	16	Alto	Con Filtro
19,9886	20,007	0,0184	Hysteresis	20	Alto	Con Filtro
23,9847	24,001	0,0163	Hysteresis	24	Alto	Con Filtro
27,9796	27,966	-0,0136	Hysteresis	28	Alto	Con Filtro
7,9958	8,009	0,0132	Reg Grow	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,009	0,0148	Reg Grow	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,003	0,0102	Reg Grow	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	20,016	0,0274	Reg Grow	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,034	0,0493	Reg Grow	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	28,015	0,0354	Reg Grow	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	7,977	-0,0188	Reg Grow	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	11,972	-0,0222	Reg Grow	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	15,957	-0,0358	Reg Grow	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	19,982	-0,0066	Reg Grow	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	23,955	-0,0297	Reg Grow	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	27,973	-0,0066	Reg Grow	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	7,964	-0,0318	Reg Grow	8	Basso	Con Filtro
11,9942	11,934	-0,0602	Reg Grow	12	Basso	Con Filtro
15,9928	15,949	-0,0438	Reg Grow	16	Basso	Con Filtro
19,9886	19,94	-0,0486	Reg Grow	20	Basso	Con Filtro
23,9847	23,97	-0,0147	Reg Grow	24	Basso	Con Filtro
27,9796	27,95	-0,0296	Reg Grow	28	Basso	Con Filtro
7,9958	7,958	-0,0378	Reg Grow	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	11,966	-0,0282	Reg Grow	12	Alto	Senza Filtro

15,9928	15,984	-0,0088	Reg Grow	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	19,951	-0,0376	Reg Grow	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	23,973	-0,0117	Reg Grow	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	27,947	-0,0326	Reg Grow	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	7,968	-0,0278	Reg Grow	8	Alto	Con Filtro
11,9942	11,998	0,0038	Reg Grow	12	Alto	Con Filtro
15,9928	15,947	-0,0458	Reg Grow	16	Alto	Con Filtro
19,9886	19,983	-0,0056	Reg Grow	20	Alto	Con Filtro
23,9847	23,956	-0,0287	Reg Grow	24	Alto	Con Filtro
27,9796	27,986	0,0064	Reg Grow	28	Alto	Con Filtro
7,9958	7,942	-0,0538	Reg Grow	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	11,934	-0,0602	Reg Grow	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	15,926	-0,0668	Reg Grow	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	19,986	-0,0026	Reg Grow	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	23,98	-0,0047	Reg Grow	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	27,951	-0,0286	Reg Grow	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	7,921	-0,0748	Reg Grow	8	Basso	Con Filtro
11,9942	11,933	-0,0612	Reg Grow	12	Basso	Con Filtro
15,9928	15,943	-0,0498	Reg Grow	16	Basso	Con Filtro
19,9886	19,955	-0,0336	Reg Grow	20	Basso	Con Filtro
23,9847	23,961	-0,0237	Reg Grow	24	Basso	Con Filtro
27,9796	27,95	-0,0296	Reg Grow	28	Basso	Con Filtro
7,9958	7,964	-0,0318	Reg Grow	8	Alto	Con Filtro
11,9942	11,957	-0,0372	Reg Grow	12	Alto	Con Filtro
15,9928	15,952	-0,0408	Reg Grow	16	Alto	Con Filtro
19,9886	19,964	-0,0246	Reg Grow	20	Alto	Con Filtro
23,9847	23,936	-0,0487	Reg Grow	24	Alto	Con Filtro
27,9796	27,929	-0,0506	Reg Grow	28	Alto	Con Filtro
7,9958	8,063	0,0672	Sobel 3D	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,094	0,0998	Sobel 3D	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,066	0,0732	Sobel 3D	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	20,06	0,0714	Sobel 3D	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,062	0,0773	Sobel 3D	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	28,062	0,0824	Sobel 3D	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	8,091	0,0952	Sobel 3D	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	12,092	0,0978	Sobel 3D	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	16,088	0,0952	Sobel 3D	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	20,084	0,0954	Sobel 3D	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	24,045	0,0603	Sobel 3D	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	28,053	0,0734	Sobel 3D	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	8,074	0,0782	Sobel 3D	8	Basso	Con Filtro
11,9942	12,069	0,0748	Sobel 3D	12	Basso	Con Filtro
15,9928	16,059	0,0662	Sobel 3D	16	Basso	Con Filtro
19,9886	20,053	0,0644	Sobel 3D	20	Basso	Con Filtro
23,9847	24,045	0,0603	Sobel 3D	24	Basso	Con Filtro
27,9796	28,039	0,0594	Sobel 3D	28	Basso	Con Filtro
7,9958	8,063	0,0672	Sobel 3D	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,095	0,1008	Sobel 3D	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,056	0,0632	Sobel 3D	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	20,052	0,0634	Sobel 3D	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,082	0,0973	Sobel 3D	24	Alto	Senza Filtro

27,9796	28,068	0,0884	Sobel 3D	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	8,021	0,0252	Sobel 3D	8	Alto	Con Filtro
11,9942	12,08	0,0858	Sobel 3D	12	Alto	Con Filtro
15,9928	16,074	0,0812	Sobel 3D	16	Alto	Con Filtro
19,9886	20,039	0,0504	Sobel 3D	20	Alto	Con Filtro
23,9847	24,062	0,0773	Sobel 3D	24	Alto	Con Filtro
27,9796	28,023	0,0434	Sobel 3D	28	Alto	Con Filtro
7,9958	8,03	0,0342	Sobel 3D	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	12,046	0,0518	Sobel 3D	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	16,058	0,0652	Sobel 3D	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	20,014	0,0254	Sobel 3D	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	24,034	0,0493	Sobel 3D	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	28,014	0,0344	Sobel 3D	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	8,053	0,0572	Sobel 3D	8	Basso	Con Filtro
11,9942	12,064	0,0698	Sobel 3D	12	Basso	Con Filtro
15,9928	16,06	0,0672	Sobel 3D	16	Basso	Con Filtro
19,9886	20,053	0,0644	Sobel 3D	20	Basso	Con Filtro
23,9847	24,034	0,0493	Sobel 3D	24	Basso	Con Filtro
27,9796	28,01	0,0304	Sobel 3D	28	Basso	Con Filtro
7,9958	8,007	0,0112	Sobel 3D	8	Alto	Con Filtro
11,9942	12,024	0,0298	Sobel 3D	12	Alto	Con Filtro
15,9928	16,038	0,0452	Sobel 3D	16	Alto	Con Filtro
19,9886	20,031	0,0424	Sobel 3D	20	Alto	Con Filtro
23,9847	24,045	0,0603	Sobel 3D	24	Alto	Con Filtro
27,9796	28,016	0,0364	Sobel 3D	28	Alto	Con Filtro
7,9958	8,081	0,0852	Sob 3D 5d	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,091	0,0968	Sob 3D 5d	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,101	0,1082	Sob 3D 5d	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	20,08	0,0914	Sob 3D 5d	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,075	0,0903	Sob 3D 5d	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	28,054	0,0744	Sob 3D 5d	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	8,085	0,0892	Sob 3D 5d	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	12,089	0,0948	Sob 3D 5d	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	16,078	0,0852	Sob 3D 5d	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	20,06	0,0714	Sob 3D 5d	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	24,083	0,0983	Sob 3D 5d	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	28,065	0,0854	Sob 3D 5d	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	8,074	0,0782	Sob 3D 5d	8	Basso	Con Filtro
11,9942	12,067	0,0728	Sob 3D 5d	12	Basso	Con Filtro
15,9928	16,06	0,0672	Sob 3D 5d	16	Basso	Con Filtro
19,9886	20,052	0,0634	Sob 3D 5d	20	Basso	Con Filtro
23,9847	24,046	0,0613	Sob 3D 5d	24	Basso	Con Filtro
27,9796	28,038	0,0584	Sob 3D 5d	28	Basso	Con Filtro
7,9958	8,075	0,0792	Sob 3D 5d	8	Alto	Senza Filtro
11,9942	12,083	0,0888	Sob 3D 5d	12	Alto	Senza Filtro
15,9928	16,068	0,0752	Sob 3D 5d	16	Alto	Senza Filtro
19,9886	20,064	0,0754	Sob 3D 5d	20	Alto	Senza Filtro
23,9847	24,067	0,0823	Sob 3D 5d	24	Alto	Senza Filtro
27,9796	28,068	0,0884	Sob 3D 5d	28	Alto	Senza Filtro
7,9958	8,062	0,0662	Sob 3D 5d	8	Alto	Con Filtro
11,9942	12,079	0,0848	Sob 3D 5d	12	Alto	Con Filtro

15,9928	16,084	0,0912	Sob 3D 5d	16	Alto	Con Filtro
19,9886	20,064	0,0754	Sob 3D 5d	20	Alto	Con Filtro
23,9847	24,052	0,0673	Sob 3D 5d	24	Alto	Con Filtro
27,9796	28,034	0,0544	Sob 3D 5d	28	Alto	Con Filtro
7,9958	8,03	0,0342	Sob 3D 5d	8	Basso	Senza Filtro
11,9942	12,045	0,0508	Sob 3D 5d	12	Basso	Senza Filtro
15,9928	16,061	0,0682	Sob 3D 5d	16	Basso	Senza Filtro
19,9886	20,045	0,0564	Sob 3D 5d	20	Basso	Senza Filtro
23,9847	24,041	0,0563	Sob 3D 5d	24	Basso	Senza Filtro
27,9796	28,029	0,0494	Sob 3D 5d	28	Basso	Senza Filtro
7,9958	8,073	0,0772	Sob 3D 5d	8	Basso	Con Filtro
11,9942	12,067	0,0728	Sob 3D 5d	12	Basso	Con Filtro
15,9928	16,069	0,0762	Sob 3D 5d	16	Basso	Con Filtro
19,9886	20,092	0,1034	Sob 3D 5d	20	Basso	Con Filtro
23,9847	24,053	0,0683	Sob 3D 5d	24	Basso	Con Filtro
27,9796	28,02	0,0404	Sob 3D 5d	28	Basso	Con Filtro
7,9958	8,008	0,0122	Sob 3D 5d	8	Alto	Con Filtro
11,9942	12,023	0,0288	Sob 3D 5d	12	Alto	Con Filtro
15,9928	16,038	0,0452	Sob 3D 5d	16	Alto	Con Filtro
19,9886	20,031	0,0424	Sob 3D 5d	20	Alto	Con Filtro
23,9847	24,045	0,0603	Sob 3D 5d	24	Alto	Con Filtro
27,9796	28,038	0,0584	Sob 3D 5d	28	Alto	Con Filtro

Titanio

Val Mis CMM	Valori Mis	Errore	Algoritmo	Diametro	Livello Energia	Filtro Fisico
6,076	6,069	-0,007	Canny	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,092	0,0122	Canny	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,072	0,0013	Canny	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,053	-0,0174	Canny	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,035	-0,019	Canny	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,083	0,007	Canny	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,078	-0,0018	Canny	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,058	-0,0127	Canny	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,054	-0,0164	Canny	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,035	-0,019	Canny	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,083	0,007	Canny	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,077	-0,0028	Canny	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,072	0,0013	Canny	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,054	-0,0164	Canny	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,048	-0,006	Canny	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,083	0,007	Canny	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,077	-0,0028	Canny	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,073	0,0023	Canny	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,067	-0,0034	Canny	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,048	-0,006	Canny	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,07	-0,006	Canny	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,078	-0,0018	Canny	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,066	-0,0047	Canny	12	Basso	Con Filtro

15,0704	15,054	-0,0164	Canny	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,035	-0,019	Canny	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,096	0,02	Canny	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,104	0,0242	Canny	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,072	0,0013	Canny	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,067	-0,0034	Canny	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,048	-0,006	Canny	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,05	-0,026	Canny	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,063	-0,0168	Canny	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,048	-0,0227	Canny	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,048	-0,0224	Canny	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,04	-0,014	Canny	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,05	-0,026	Canny	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,075	-0,0048	Canny	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,061	-0,0097	Canny	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,048	-0,0224	Canny	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,032	-0,022	Canny	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,096	0,02	Hysteresis	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,104	0,0242	Hysteresis	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,072	0,0013	Hysteresis	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,079	0,0086	Hysteresis	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,061	0,007	Hysteresis	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,096	0,02	Hysteresis	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,091	0,0112	Hysteresis	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,098	0,0273	Hysteresis	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,067	-0,0034	Hysteresis	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,062	0,008	Hysteresis	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,083	0,007	Hysteresis	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,104	0,0242	Hysteresis	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,072	0,0013	Hysteresis	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,08	0,0096	Hysteresis	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,054	0	Hysteresis	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,043	-0,033	Hysteresis	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,064	-0,0158	Hysteresis	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,046	-0,0247	Hysteresis	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,014	-0,0564	Hysteresis	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,022	-0,032	Hysteresis	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,095	0,019	Hysteresis	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,09	0,0102	Hysteresis	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,099	0,0283	Hysteresis	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,08	0,0096	Hysteresis	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,047	-0,007	Hysteresis	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,109	0,033	Hysteresis	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,131	0,0512	Hysteresis	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,079	0,0083	Hysteresis	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,08	0,0096	Hysteresis	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,048	-0,006	Hysteresis	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,037	-0,039	Hysteresis	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,062	-0,0178	Hysteresis	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,048	-0,0227	Hysteresis	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,02	-0,0504	Hysteresis	15	Alto	Senza Filtro

18,054	18,018	-0,036	Hysteresis	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,024	-0,052	Hysteresis	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,034	-0,0458	Hysteresis	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,021	-0,0497	Hysteresis	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,019	-0,0514	Hysteresis	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,017	-0,037	Hysteresis	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,083	0,007	Reg Grow	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,079	-0,0008	Reg Grow	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,058	-0,0127	Reg Grow	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,067	-0,0034	Reg Grow	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,049	-0,005	Reg Grow	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,069	-0,007	Reg Grow	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,064	-0,0158	Reg Grow	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,046	-0,0247	Reg Grow	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,04	-0,0304	Reg Grow	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,035	-0,019	Reg Grow	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,056	-0,02	Reg Grow	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,077	-0,0028	Reg Grow	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,045	-0,0257	Reg Grow	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,04	-0,0304	Reg Grow	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,035	-0,019	Reg Grow	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,029	-0,047	Reg Grow	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,051	-0,0288	Reg Grow	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,032	-0,0387	Reg Grow	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,027	-0,0434	Reg Grow	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,01	-0,044	Reg Grow	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,056	-0,02	Reg Grow	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,077	-0,0028	Reg Grow	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,045	-0,0257	Reg Grow	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,054	-0,0164	Reg Grow	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,035	-0,019	Reg Grow	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,056	-0,02	Reg Grow	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,051	-0,0288	Reg Grow	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,045	-0,0257	Reg Grow	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,04	-0,0304	Reg Grow	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,022	-0,032	Reg Grow	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,05	-0,026	Reg Grow	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,076	-0,0038	Reg Grow	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,047	-0,0237	Reg Grow	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,053	-0,0174	Reg Grow	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,045	-0,009	Reg Grow	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,05	-0,026	Reg Grow	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,036	-0,0438	Reg Grow	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,047	-0,0237	Reg Grow	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,047	-0,0234	Reg Grow	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,032	-0,022	Reg Grow	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,11	0,034	Sobel 3D	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,13	0,0502	Sobel 3D	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,1	0,0293	Sobel 3D	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,093	0,0226	Sobel 3D	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,075	0,021	Sobel 3D	18	Basso	Senza Filtro

6,076	6,109	0,033	Sobel 3D	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,108	0,0282	Sobel 3D	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,086	0,0153	Sobel 3D	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,094	0,0236	Sobel 3D	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,074	0,02	Sobel 3D	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,082	0,006	Sobel 3D	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,104	0,0242	Sobel 3D	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,075	0,0043	Sobel 3D	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,067	-0,0034	Sobel 3D	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,061	0,007	Sobel 3D	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,083	0,007	Sobel 3D	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,091	0,0112	Sobel 3D	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,073	0,0023	Sobel 3D	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,08	0,0096	Sobel 3D	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,061	0,007	Sobel 3D	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,109	0,033	Sobel 3D	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,104	0,0242	Sobel 3D	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,098	0,0273	Sobel 3D	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,08	0,0096	Sobel 3D	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,075	0,021	Sobel 3D	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,081	0,005	Sobel 3D	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,084	0,0042	Sobel 3D	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,041	-0,0297	Sobel 3D	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,064	-0,0064	Sobel 3D	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,031	-0,023	Sobel 3D	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,09	0,014	Sobel 3D	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,115	0,0352	Sobel 3D	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,088	0,0173	Sobel 3D	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,085	0,0146	Sobel 3D	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,071	0,017	Sobel 3D	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,104	0,028	Sobel 3D	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,115	0,0352	Sobel 3D	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,102	0,0313	Sobel 3D	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,099	0,0286	Sobel 3D	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,085	0,031	Sobel 3D	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,109	0,033	Sob 3D 5d	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,103	0,0232	Sob 3D 5d	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,112	0,0413	Sob 3D 5d	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,094	0,0236	Sob 3D 5d	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,088	0,034	Sob 3D 5d	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,089	0,013	Sob 3D 5d	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,121	0,0412	Sob 3D 5d	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,113	0,0423	Sob 3D 5d	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,119	0,0486	Sob 3D 5d	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,086	0,032	Sob 3D 5d	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,082	0,006	Sob 3D 5d	6	Alto	Con Filtro
9,0798	9,092	0,0122	Sob 3D 5d	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,072	0,0013	Sob 3D 5d	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,065	-0,0054	Sob 3D 5d	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,048	-0,006	Sob 3D 5d	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,096	0,02	Sob 3D 5d	6	Alto	Con Filtro

9,0798	9,104	0,0242	Sob 3D 5d	9	Alto	Con Filtro
12,0707	12,072	0,0013	Sob 3D 5d	12	Alto	Con Filtro
15,0704	15,067	-0,0034	Sob 3D 5d	15	Alto	Con Filtro
18,054	18,062	0,008	Sob 3D 5d	18	Alto	Con Filtro
6,076	6,109	0,033	Sob 3D 5d	6	Basso	Con Filtro
9,0798	9,131	0,0512	Sob 3D 5d	9	Basso	Con Filtro
12,0707	12,099	0,0283	Sob 3D 5d	12	Basso	Con Filtro
15,0704	15,094	0,0236	Sob 3D 5d	15	Basso	Con Filtro
18,054	18,088	0,034	Sob 3D 5d	18	Basso	Con Filtro
6,076	6,096	0,02	Sob 3D 5d	6	Basso	Senza Filtro
9,0798	9,091	0,0112	Sob 3D 5d	9	Basso	Senza Filtro
12,0707	12,085	0,0143	Sob 3D 5d	12	Basso	Senza Filtro
15,0704	15,067	-0,0034	Sob 3D 5d	15	Basso	Senza Filtro
18,054	18,048	-0,006	Sob 3D 5d	18	Basso	Senza Filtro
6,076	6,103	0,027	Sob 3D 5d	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,102	0,0222	Sob 3D 5d	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,101	0,0303	Sob 3D 5d	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,085	0,0146	Sob 3D 5d	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,084	0,03	Sob 3D 5d	18	Alto	Senza Filtro
6,076	6,103	0,027	Sob 3D 5d	6	Alto	Senza Filtro
9,0798	9,114	0,0342	Sob 3D 5d	9	Alto	Senza Filtro
12,0707	12,087	0,0163	Sob 3D 5d	12	Alto	Senza Filtro
15,0704	15,099	0,0286	Sob 3D 5d	15	Alto	Senza Filtro
18,054	18,098	0,044	Sob 3D 5d	18	Alto	Senza Filtro

Bibliografia

- [1] Reimers P, Goebbels J (1983) New Possibilities of Non-Destructive Evaluation by X-ray Computed Tomography. *Materials Evaluation* 41:732–737.
- [2] J.P. Kruth, M. Bartscher, S. Carmignato, R. Schmitt, L. De Chiffre, A. Weckenmann (2011) *Computed tomography for dimensional metrology*.
- [3] Kak AC, Slaney M (1988) *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. IEEE Press, New York.
- [4] Ball J, Moore A (1997) *Essential Physics for Radiographers*. 3rd ed. Blackwell Science, Oxford.
- [5] L. De Chiffre, S. Carmignato, J.-P. Kruth, R. Schmitt, A. Weckenmann (2014) *Industrial applications of computed tomography*.
- [6] O. Wirjadi (2007) *Survey of 3d image segmentation methods*.
- [7] T.W. Ridler and S. Calvard. Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 8(8):630–632, Aug 1978.
- [8] Asjad Amin, Mohamed Deriche (2015) *A new approach for salt dome detection using a 3D multidirectional edge detector*.
- [9] John Canny (1986) *A Computational Approach to Edge Detection*.
- [10] DC Montgomery (2008) *Design and analysis of experiments*.
- [11] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, S.L. Eddins (2004) *Digital Image Processing using Matlab*.
- [12] M. Ragazzo (2013) *Studio delle cause d'errore e verifica delle prestazioni di un impianto tomografico a raggi-X*.
- [13] R. Jimenez, C. Comps, J.A. Yagüe (2015) *An optimized segmentation algorithm for the surface extraction in computed tomography for metrology applications*.

- [14]S. Carmignato (2012) Accuracy of industrial computed tomography measurements: Experimental results from an international comparison.
- [15]L. Franco, P.G. Tahoces, J.A. Martinez-Mera (2013) Visualization software for CT: fan/cone beam and metrology applications.
- [16]M. Bartscher, U. Hilpert, J. Goebbels, G. Weidemann. Enhancement and proof of accuracy of industrial Computed Tomography (CT) Measurements.
- [17]J.A. Yagüe-Fabra, S. Ontiveros, R.Jimenez, S. Chitchian, G. Tosello, S. Carmignato. (2013) A 3D edge detection technique for surface extraction in computed tomography for dimensional metrology applications.
- [18]R. Jimenez, S. Ontiveros, S. Carmignato, J.A. Yagüe-Fabra (2013) Fundamental correction strategies for accuracy improvement of dimensional measurements obtained from convectional micro-CT cone beam machine.
- [19]Malthe-Sorensen, Anders (2015)Elementary mechanics using Matlab : a modern course combining analytical and numerical techniques