

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Caratterizzazione metrologica di strumenti diagnostici 3D
per applicazioni chirurgiche



Relatore
Prof. Gianfranco Genta

Candidato
Michele Spadaro

Anno Accademico 2019/2020

“A Claretta, sempre presente nel mio cuore”

Ringraziamenti

A conclusione di questo periodo di studi, mi sento in dovere di ringraziare le persone che mi hanno seguito, accompagnato e sostenuto durante tutto il percorso.

Innanzitutto, devo ringraziare chi, con impegno e disponibilità, ha concretamente contribuito alla stesura della presente tesi, ovvero il mio relatore, Prof. Gianfranco Genta, e il Dott. Giacomo Maculotti. La loro costante presenza negli ultimi mesi ha permesso il raggiungimento dei risultati attesi, mi hanno sempre consigliato al meglio e fornito la sicurezza di poter contare su di loro.

Ringrazio la mia famiglia per gli enormi sacrifici fatti che mi hanno permesso di raggiungere questo obiettivo.

Ringrazio Silvia, riferimento importante in questi anni, che mi ha sempre sostenuto e aiutato a superare i momenti difficili.

Gli ultimi ringraziamenti vanno, ma non per importanza, ai miei amici e ai miei colleghi per la loro presenza costante nella mia vita.

Indice

1. Introduzione	11
1.1 Landmarking facciale per applicazioni in ambito chirurgico	12
1.2 Descrizione del sensore	16
1.3 Definizione di incertezza per strumenti di misura in ambito chirurgico.	21
2. Metodologia	24
2.1 Descrizione esperimenti.....	24
2.2 Workflow	26
2.3 Metodi statistici e indicatori	30
2.3.1 Indicatore sintetico p	30
2.3.2 Mean Square Error.....	34
2.3.3 Incertezza del landmarking.....	37
3. Risultati.....	40
3.1 Indicatore p	40
3.2 Mean Square Error.....	46
3.2.1 MSE direzione x	46
3.2.2 MSE direzione y	51
3.2.3 MSE direzione z	55
3.3 Propagazione dell'incertezza landmark.....	61
4. Conclusioni.....	66
APPENDICE A – SCRIPT MATLAB.....	68
A.1 Script per calcolo indicatore p	68
A.2 Script per calcolo MSE	69

APPENDICE B – TABELLE TEST IPOTESI	72
B.1 Test d'ipotesi sulle proporzioni p	72
B.2 Test d'ipotesi sull'MSE direzione z	73
Bibliografia e Sitografia	74

Indice delle figure

Figura 1.1 Schema utilizzato per definire le free-form.....	13
Figura 1.2 Landmarking e distanze geodetiche utilizzate per il riconoscimento facciale [2].....	14
Figura 1.3 Componenti frontali del sensore [3]	16
Figura 1.4 Componenti posteriori del sensore [3]	16
Figura 1.5 Sistema di Imaging 3D integrato all'SR300 [3]	18
Figura 1.6 Flusso per l'acquisizione dei video tramite sensore [3]	18
Figura 1.7 Valutazione qualitativa dell'errore introdotto nella misurazione di una superficie piana [4].....	19
Figura 1.8 Relazione tra errore di profondità e distanza dal sensore di un riferimento piano [4].....	20
Figura 2.1 Le otto condizioni dell'Individuo_1	24
Figura 2.2 Nella colonna sinistra i frame dei video acquisiti per l'Individuo_1 in condizioni di buio e nella colonna destra i frame acquisiti sempre per lo stesso individuo ma in condizioni di luce	25
Figura 2.3 Individuo_2_buio_70_cm	26
Figura 2.4 A sinistra il frame originale di Individuo_3_buio_70cm_1587736756128, a destra il crop elaborato.....	26
Figura 2.5 Point Cloud del quindicesimo crop di Individuo_3_buio_40 cm.....	28
Figura 2.6 In ordine da sinistra a destra i landmark posizionati da Operatore_1, Operatore_2 e Operatore_3 sul frame Individuo_2_luce_25cm	29
Figura 3.1 Grafico a dispersione: distanza vs media delle p.....	40
Figura 3.2 Intervalli di fiducia delle proporzioni p.....	41
Figura 3.3 Grafico a dispersione: distanza vs errore x	46
Figura 3.4 Grafico a dispersione: distanza vs errore y	51
Figura 3.5 Grafico a dispersione: distanza vs errore z.....	55

Figura 3.6 intervalli di fiducia relativa a individuo_1_luce_25cm del landmark Alare destro direzione x 62

Figura 3.7 intervalli di fiducia relativa a Individuo_1_luce_25cm del landmark Alare sinistro direzione x 64

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 Parametri della IR Camera e Color Camera [3]	17
Tabella 1.2 Parametri dell'IR Laser projector [3]	17
Tabella 1.3 Specifiche tecniche di SR300 [4].....	19
Tabella 2.1 Esempio di tabelle per il confronto del test d'ipotesi	33
Tabella 2.2 Esempio di struttura dati delle misure, Alare_dx direzione x	37
Tabella 2.3 Esempio struttura dati dell'estrapolazione dell'MSE di Alare_dx, x.....	38
Tabella 3.1 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 25 cm	42
Tabella 3.2 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 40 cm	42
Tabella 3.3 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 55 cm	43
Tabella 3.4 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 70 cm	43
Tabella 3.5 test d'ipotesi sulle proporzioni di Individuo_1 buio e luce	44
Tabella 3.6 Test ipotesi sulle proporzioni di Individuo_2 luce e buio.....	44
Tabella 3.7 Test ipotesi sulle proporzioni di Individuo_3 luce e buio.....	45
Tabella 3.8 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 25 cm	47
Tabella 3.9 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 40 cm	47
Tabella 3.10 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 55 cm	48
Tabella 3.11 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 70 cm	48
Tabella 3.12 Test ipotesi per MSE direzione x di individuo_1 luce e buio	48
Tabella 3.13 Test ipotesi per MSE direzione x di individuo_2 luce e buio	49
Tabella 3.14 Test ipotesi per MSE direzione x di individuo_2 luce e buio	49
Tabella 3.15 Test ipotesi per MSE x a distanza di 25 e 40 cm	50
Tabella 3.16 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 25 cm	52
Tabella 3.17 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 40 cm	52
Tabella 3.18 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 55 cm	52
Tabella 3.19 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 70 cm	53
Tabella 3.20 Test ipotesi per MSE direzione y di Individuo_1 luce e buio	53

Tabella 3.21 Test ipotesi per MSE direzione y di Individuo_2 luce e buio	54
Tabella 3.22 Test ipotesi per MSE direzione y di Individuo_3 luce e buio	54
Tabella 3.23 Test ipotesi per MSE y a distanza di 25 e 40 cm	55
Tabella 3.24 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 25 cm	56
Tabella 3.25 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 40 cm	56
Tabella 3.26 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 55 cm	57
Tabella 3.27 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 70 cm	57
Tabella 3.28 Test ipotesi per MSE direzione z di Individuo_1 luce e buio	58
Tabella 3.29 Test ipotesi per MSE direzione z di Individuo_2 luce e buio	58
Tabella 3.30 Test ipotesi per MSE direzione z di Individuo_3 luce e buio	59
Tabella 3.31 Test ipotesi per MSE direzione z distanza 25, 40, e 55 cm.....	60
Tabella 3.32 Sintesi delle condizioni in cui l'operatore è risultato non significativo .	61
Tabella 3.33 Analisi della varianza relativa a Individuo_1_luce_25cm del landmark Alare destro direzione x	62
Tabella 3.34 Analisi della varianza relativa a Individuo_1_luce_25cm del landmark Alare sinistro direzione x.....	63
Tabella 3.35 Riassunto del confronto tra intervalli di fiducia tra operatori.....	63
Tabella 3.36 Condizioni di valori di incertezza estesa superiori a quelli di riferimento	65

1. Introduzione

Negli ultimi decenni il campo medico ha beneficiato dell'ingresso di metodologie 3D nelle tecnologie diagnostiche tradizionali, quali risonanza magnetica, TAC (tomografia assiale computerizzata) ed ecografia; i metodi tridimensionali alla base di queste innovazioni sono tuttavia ancora acerbi o incompleti, limitati a pratiche specifiche e quindi poco adatti alla diagnosi. In particolare, uno dei settori medici in cerca di soluzioni 3D è quello della chirurgia maxillofacciale, che necessita di modelli specifici per pianificare gli interventi correttivi.

Questo lavoro di tesi si inserisce in un progetto di ricerca interdisciplinare, denominato "3D SURGEERED", sul tema "Progettazione di un protocollo per la pianificazione preoperatoria tramite la modellazione 3D". Tale progetto, coordinato dal Prof. Maurizio Galetto, coinvolge diversi gruppi di ricerca del "Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione" del Politecnico di Torino e il team di chirurgia maxillofacciale dell'ospedale "Molinette" di Torino. L'idea progettuale si basa sull'applicazione in campo chirurgico dei principi della modellizzazione tridimensionale, tipici dell'ambito ingegneristico.

Si tratta, in primo luogo, di utilizzare i modelli 3D dei volti e dei crani dei pazienti, estratti dalle risonanze magnetiche effettuate prima e dopo l'intervento, per studiarne gli scostamenti tra il pre- e il post-operatorio e modellarli per progettare, per ogni tipologia di intervento, un sistema semi-automatico di simulazione dei movimenti del volto a valle delle operazioni chirurgiche.

In secondo luogo, la disponibilità di modelli tridimensionali di organi e tessuti aprirà la strada all'impiego di tecnologie aggiuntive di ausilio alla preparazione dell'intervento operatorio, quali la fabbricazione additiva (AM). La ricostruzione del pezzo anatomico permetterà, infatti, di preparare e modellare in anticipo placche e viti ove si rendesse necessario il loro utilizzo. Avendo a disposizione i modelli virtuali, si potranno inoltre progettare al computer le dime chirurgiche e le protesi che saranno impiantate nello specifico paziente, dopo essere state prodotte mediante sistemi CAM (Computer Aided Manufacturing), utilizzando ad esempio sostituti ossei (tipo *SmartBone*®), o direttamente per fabbricazione additiva in materiale metallico o in nuovi materiali biocompatibili.

In tale contesto, assumono particolare rilevanza l'incertezza di misura e gli errori sistematici introdotti dalle procedure e dai sistemi di misura impiegati in fase di acquisizione dei dati 3D, nonché la loro propagazione attraverso gli algoritmi matematici usati per la simulazione. Per tale motivo, il lavoro di tesi si focalizza sulla qualifica metrologica del sensore *RealSense SR300*, per verificarne l'idoneità dell'utilizzo nel campo della chirurgia maxillo-facciale.

Questo lavoro di tesi si suddivide in due fasi, la prima è quella dell'analisi dei fattori di influenza nell'acquisizione dei dati 3D, mentre la seconda si concentra sulla stima dell'incertezza del landmarking, ossia l'identificazione e la localizzazione di alcuni punti caratteristici del volto.

Per individuare i fattori di influenza si ricorre prima ad un indicatore sintetico (p), il quale dà informazioni sul numero di punti non identificati durante l'acquisizione dei frame, successivamente alla varianza di ogni singolo pixel relativo alle sue tre dimensioni (x,y,z).

Quest'ultima è importante per il successivo calcolo dell'incertezza del landmarking.

Tutto questo processo viene fatto tramite software come Intel RealSense per l'acquisizione dei singoli frame, Matlab per l'elaborazione dei dati e Minitab per l'analisi dei dati.

1.1 Landmarking facciale per applicazioni in ambito chirurgico

Il volto è una delle parti dell'anatomia umana più importante, il suo studio è molto importante specialmente nello sviluppo automatico della sicurezza pubblica. Qui è importante convertire quello che riesce a fare una persona per riconoscere e distinguere altre persone, estraendo implicitamente delle caratteristiche morfologiche.

Per riuscire a riconoscere automaticamente la forma e le caratteristiche si ricorre al dominio geometrico, per cui sono utilizzati dei descrittori geometrici.

L'attuale attenzione ad algoritmi automatici che permettono il riconoscimento è dato dallo sviluppo di tre grandi rami: verifica facciale, identificazione facciale e chirurgia maxillofacciale.

Inizialmente in questo campo si lavorava con le due dimensioni (2D), successivamente, alla fine degli anni '80, si iniziò ad implementare la tecnologia tridimensionale (3D).

Il 3D è un metodo molto più accurato, rispetto al precedente 2D, infatti esso permette il riconoscimento delle geometrie anche in espressioni facciali differenti, in presenza di trucco, con orientamenti diversi e in condizione di luce differenti. Le diverse espressioni facciali assunte da una persona erano i principali ostacoli per il riconoscimento facciale. L'utilizzo della terza dimensione è stato possibile anche attraverso l'uso di diverse immagini in 2D dello stesso soggetto, infatti attraverso il processo di matching si può ricavare la mappatura in 3D.

Per la descrizione della geometria del volto nel corso degli anni sono stati utilizzati diversi set di parametri. Ci sono diversi algoritmi, operatori matematici, modelli e descrittori che possono essere utilizzati in questo campo.

L'uomo riesce a riconoscere le persone dal colore della pelle, degli occhi e dei capelli, questo però non è abbastanza per un riconoscimento automatico, infatti si ricorre alle caratteristiche morfologiche del viso, le quali sono le più importanti per differenziare una persona da un'altra.

Per questo motivo lo studio della profondità geometrica della superficie facciale è così importante, soprattutto l'utilizzo di descrittori diversi.

Prima di introdurre i descrittori, bisogna definire la superficie free-form.

Queste forme non appartengono a classi facilmente categorizzabili, come quelle piatte e quadratiche, ma sono caratteristiche del soggetto.

Esse sono composte da un insieme di forme piatte e quadratiche, che grazie ad opportune ipotesi di regolarità possono essere scomposte in sottodomini.

Ogni sottodominio può essere studiato come una combinazione di forme geometriche semplici come gusci sferici, cilindri, paraboloidi, selle, ecc..

In figura 1.1 si mostra lo schema utilizzato per definire le free-form.



Figura 1.1 Schema utilizzato per definire le free-form

In questi casi, per misurare le superfici non si può ricorrere alla distanza euclidea, la quale tiene conto semplicemente della distanza tra due punti senza considerare la forma assunta dalla superficie in quei punti, ma si deve ricorrere alla geometria differenziale, questo serve per ottenere la costruzione di una forma canonica, la quale sarà in grado di descrivere la superficie con funzioni geometriche semplici.

Come detto precedentemente, ci sono molteplici descrittori che possono essere utilizzati nel campo tridimensionale, quelli principali sono:

- **Coefficienti della prima forma fondamentale:** la quale permette di calcolare la lunghezza delle curve, gli angoli di vettori tangenti, le aree di regioni, cioè misurazioni sulla superficie, però senza fare riferimento allo spazio in cui si trova la superficie.
- **Coefficienti della seconda forma fondamentale:** la quale rappresenta le proprietà di curvatura della superficie e può essere ricavata direttamente dalla prima forma fondamentale e dai vettori tangente e normale.
- **Curvature:** si utilizzano per misurare come una superficie si comporta nello spazio, si può stimare osservando come cambia la tangente rispetto al piano per ogni punto della superficie. Sono dette curvature principali i due valori, massimo e minimo, della curvatura normale corrispondenti ai due versi del piano tangente.
- **Derivate:** sono utili per la descrizione del comportamento, infatti la derivata prima descrive la pendenza della superficie e identifica i punti critici dove essa è uguale a zero, invece la derivata seconda dà informazioni sui flessi.
- **Indici di forma:** descrivono la forma della superficie, essi sono indipendenti dall'unità di lunghezza
- **Indici di curvatura:** misurano la curvatura di una superficie in un punto rispetto ad un piano, sono dipendenti dall'unità di lunghezza.

In una recente pubblicazione scientifica del Prof. Enrico Vezzetti e della Dott.ssa Federica Marcolin [1], coinvolti nel progetto ricerca in cui si colloca la presente tesi, si analizzano questi descrittori per valutare:

- la **sensibilità al rumore:** durante la scansione si possono acquisire punti inesatti dovuto al cambio brusco di colore, come capelli, sopracciglia o barba, o di superficie, per esempio nella bocca, occhi, ecc.
- la **somiglianza del descrittore tra vari volti e diverse espressioni facciali:** il comportamento del descrittore tra varie scansioni in cui il soggetto rimane uguale, ma con espressioni facciali diverse.

- la **completezza nella descrizione dell'intero volto**: quanto riescono a descrivere tutte le aree del volto, da quelle con pochi cambiamenti a quelle con cambiamenti bruschi che potrebbero dar problemi nella fase di acquisizione.
- l'**uniformità del trend nelle zone vicine**: come si comporta il descrittore nell'intorno.

I risultati dello studio mostrano che questi descrittori sono validi per la descrizione di un volto e adatti a tale applicazione.

Dopo aver introdotto alcune nozioni sull'acquisizione dei volti in 3D e su come vengono descritte le superfici del volto, si può entrare nello specifico con l'introduzione del landmarking nel campo della chirurgia maxillo-facciale. Per landmarking facciale si intende l'applicazione di punti di riferimento sul viso, in punti con particolari proprietà geometriche che possono essere la punta del naso, le estremità delle narici, ecc.

L'applicazione dei punti di riferimento, chiamati comunemente landmark, può avvenire mediante algoritmi automatici o manuali, dove l'operatore e le regole di applicazione assumono un ruolo fondamentale. Essi, insieme ai descrittori, sono importanti per lo studio delle forme del viso.

I landmark si utilizzano, insieme ai descrittori, per il calcolo del volume del naso, delle distanze geodetiche e di quelle euclidee [2]. Quindi, il posizionamento dei landmark è molto importante per ottenere un risultato accurato, soprattutto per il riconoscimento facciale. In figura 1.2 si mostra un esempio di applicazione dei landmark e di un set di possibili distanze geodetiche.

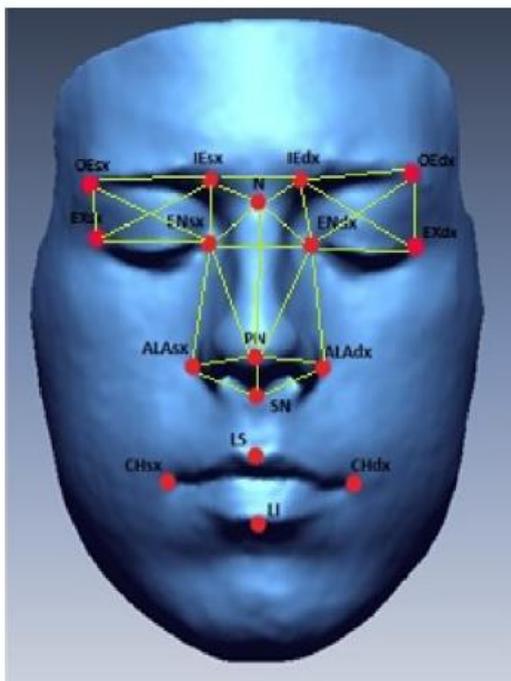


Figura 1.2 Landmarking e distanze geodetiche utilizzate per il riconoscimento facciale [2]

Vista l'importanza della precisione con cui si deve posizionare un landmark, in questo lavoro si valuta la propagazione dell'incertezza sui landmark, analizzando anche la significatività del fattore "operatore". I punti di riferimento utilizzati in questo lavoro di tesi sono cinque: alare destro, alare sinistro, nasion, pronasale e subnasale. Non si tratteranno, invece, le distanze euclidee e quelle geodetiche.

1.2 Descrizione del sensore

Il sensore utilizzato in questo lavoro per l'acquisizione dei video è il RealSense SR300. Si tratta di un sensore a basso costo la cui accuratezza e la cui precisione non sono paragonabili a quelle degli scanner professionali 3D, però risulta adeguato per un certo range di applicazioni, come la Reverse Engineering (RE) a breve distanza.

Esso può essere considerato uno dei dispositivi più promettenti e con un potenziale tale da poter superare parzialmente la limitazione di altri sistemi di telecamere di profondità basati sul tempo, disponibili in commercio, ad esempio sfruttando la compattezza e l'efficienza offerte dal proiettore laser microelettromeccanico a specchio e da sensori più veloci.

Secondo la scheda tecnica della casa produttrice [3], il sensore può essere utilizzato per diverse applicazioni, come tracking e analisi facciale, scansione e mappature, segmentazione di scene, realtà aumentata.

Nelle Figure 1.3 e 1.4 si mostrano i componenti dell'SR300.

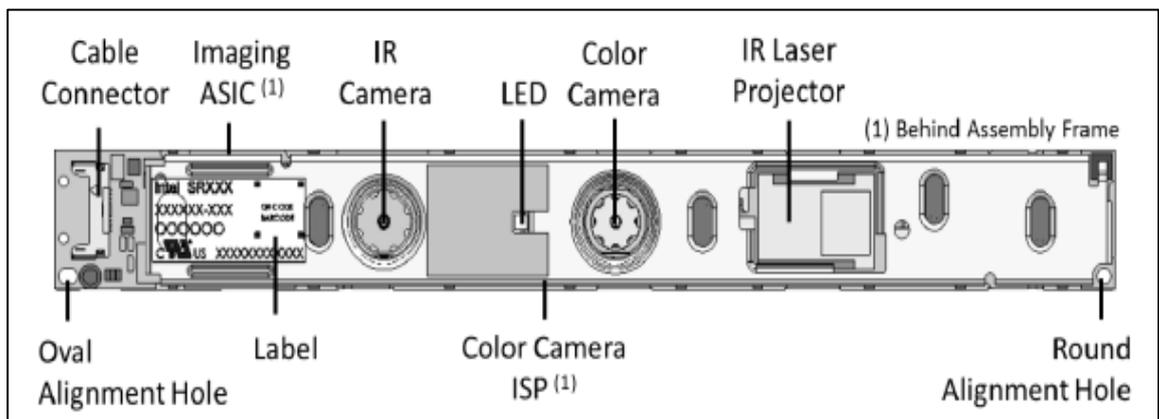


Figura 1.3 Componenti frontali del sensore [3]

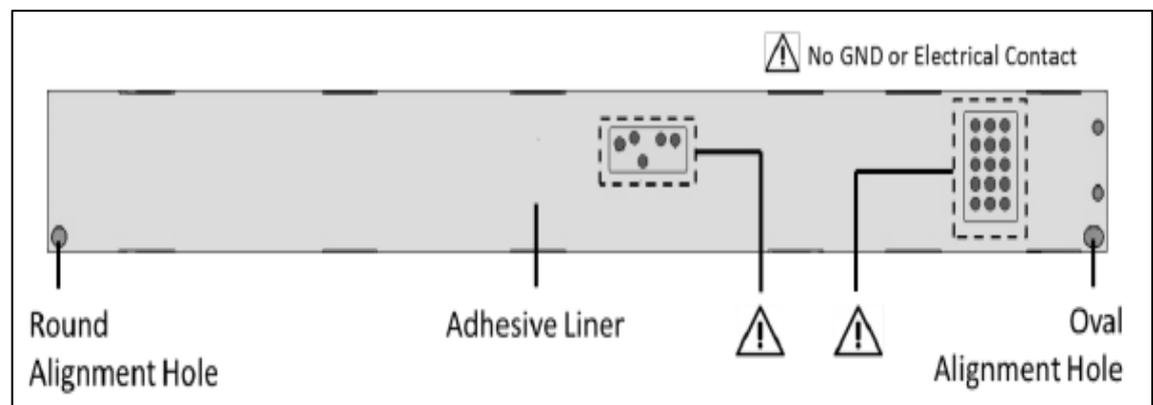


Figura 1.4 Componenti posteriori del sensore [3]

Nelle tabelle 1.1 e 1.2 si mostrano le specifiche dei componenti, cioè le proprietà della IR Camera, Color Camera e IR Laser Projector, riportate sulla scheda tecnica del sensore.

PARAMETER	INFRARED CAMERA	COLOR CAMERA
Active Pixels	640x480	1920x1080
Sensor Aspect Ratio	4:3	16:9
Vertical Field of View	55° +/-2°	41.5° +/-2°
Horizontal Field of View	71.5° +/-2°	68° +/-2°
Diagonal Field of View	88° +/-3°	75.2° +/-4°
Inclination	+/-1° Yaw/Pitch Tilt	+/-1° Yaw/Pitch Tilt

Tabella 1.1 Parametri della IR Camera e Color Camera [3]

PARAMETER	DESCRIPTION
Projector	Coded Light
Laser Wavelength	860nm Nominal
Laser Compliance	Class 1, IEC 60825-1:2014 Ed 3
Vertical Field of Projection	60° +/-4°
Horizontal Field of Projection	72.5° +/-2°
Inclination	5° +/-2° Yaw Tilt (Towards IR Camera)

Tabella 1.2 Parametri dell'IR Laser projector [3]

Per un uso ottimale del sensore, si deve operare in un range compreso tra 0 e 35 °C. Si tratta di un prodotto che implementa un sistema di imaging 3D a corto raggio, a luce strutturata. Tale strumento consente movimenti dinamici fino a 2 metri al secondo. Inoltre, esso fornisce colore, profondità, e IR video streaming sincronizzati al sistema. Il suo utilizzo è indicato per profondità da 0.2 metri fino a 1.5 metri.

Le dimensioni del dispositivo sono di circa 110 mm × 12,6 mm × 3,8–4,1 mm; il suo peso è di 9,4 g, il che lo rende molto compatto e adatto per un'ampia gamma di applicazioni di imaging 3D.

Invece, per quanto riguarda il funzionamento, il proiettore IR e la telecamera IR operano congiuntamente utilizzando modelli di luce strutturati per produrre un array 2D di valori di pixel monocromatici. Questi valori vengono elaborati dall'ASIC (Application Specific Integrated Circuit) di imaging per generare fotogrammi video di profondità e/o infrarossi che vengono trasmessi al sistema client tramite USB3.

La telecamera a colori è composta da un sensore cromatico e da un processore di segnali di immagine che cattura ed elabora i valori dei pixel cromatici. Questi valori generano fotogrammi video a colori che vengono trasmessi all'ASIC di imaging e poi trasmessi al sistema, via USB3. La telecamera a colori può funzionare indipendentemente dalla telecamera a infrarossi o funzionare in modo sincrono. In figura 1.5 viene mostrato lo schema del sistema di Imaging 3D integrato.

Per generare i frame con le informazioni sulla profondità, il proiettore IR illumina la scena con una serie di modelli di barre verticali IR codificate a frequenza spaziale crescente e predefinite.

Questi pattern sono deformati dagli oggetti, riflessi all'indietro e catturati dalla telecamera a infrarossi. I valori dei pixel della telecamera a infrarossi vengono poi elaborati dall'ASIC di imaging per generare una matrice di profondità. I successivi fotogrammi di profondità creano un flusso video che viene trasmesso al sistema. In figura 1.6 vengono illustrati i vari step per l'acquisizione dei video.

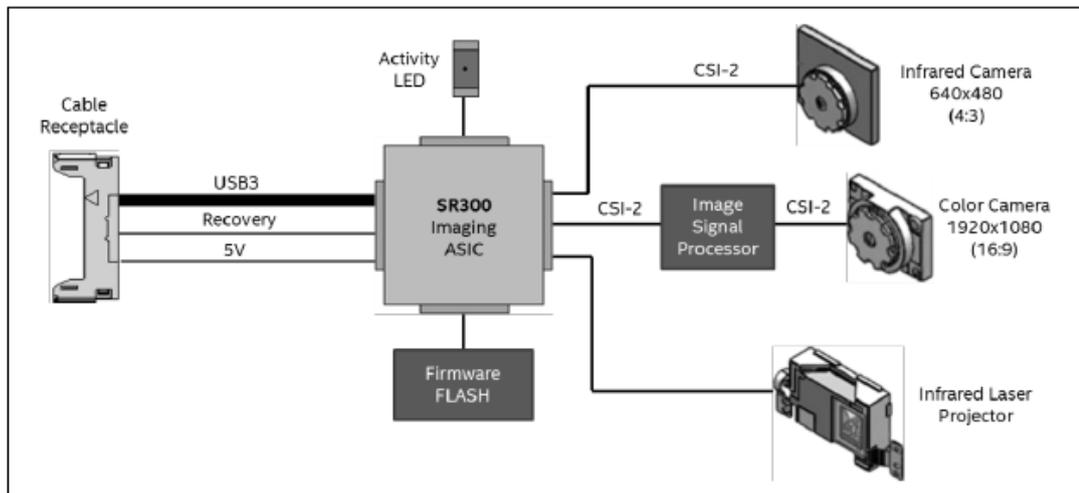


Figura 1.5 Sistema di Imaging 3D integrato all'SR300 [3]

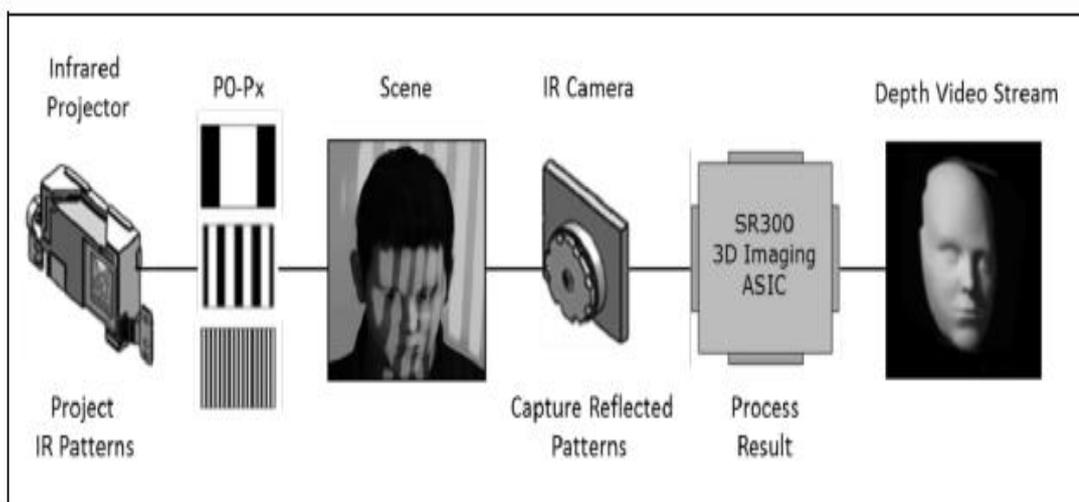


Figura 1.6 Flusso per l'acquisizione dei video tramite sensore [3]

Questo strumento è stato analizzato in un articolo della Prof.ssa Carfagni et al. [4], dove l'SR300 è stato utilizzato come un 3D scanner. Secondo questo studio, il raggio d'azione per l'utilizzo come scansione 3D dovrebbe rimanere entro 70 cm. Oltre tale distanza, la precisione diminuisce drasticamente, come mostrato in figura 1.7, in cui una porzione di parete piana viene catturata partendo da 20 cm fino a 110 cm con un passo di circa

10 cm. In tabella 1.3 sono mostrate alcune specifiche tecniche del sensore quando si trova ad una distanza di 20, 45, 60, 80 e 100 cm.

Si nota come all'aumentare della distanza la densità dei punti si riduce di molto.

Distance	Scale factor	X	Y	Framed area	Point density
[MM]	%	[MM]	[MM]	[MM ²]	[POINTS/MM ²]
200	0.4	256	192	49152	6.25
450	1	640	480	307200	1.00
600	1.3	832	624	519168	0.59
800	1.8	1152	864	995328	0.31
1000	2.3	1472	1104	1625088	0.19

Tabella 1.3 Specifiche tecniche di SR300 [4]

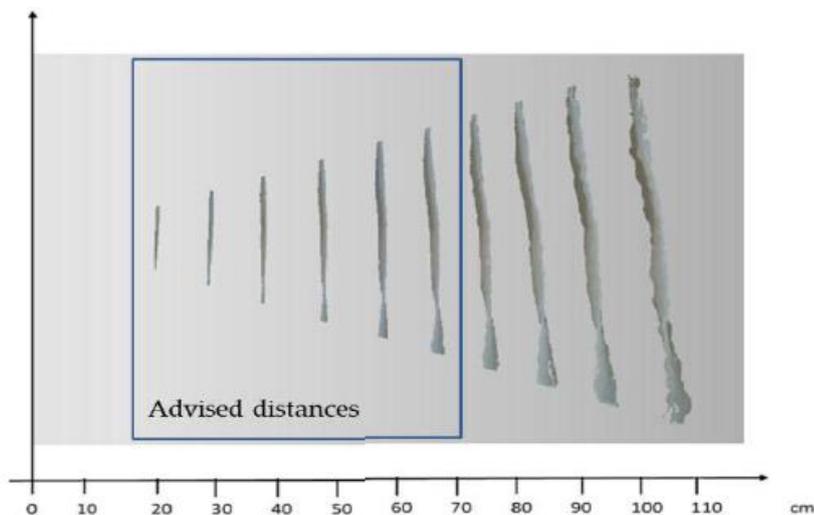


Figura 1.7 Valutazione qualitativa dell'errore introdotto nella misurazione di una superficie piana [4]

Quindi, uno dei risultati attesi in questo lavoro di tesi è che la distanza massima per ottenere un buon risultato dei video acquisiti è di 70 cm.

Infine, un altro dato interessante da prendere in considerazione per avere un termine di paragone è l'errore di profondità. Questo mostra una relazione quadratica con la distanza, come mostrato nella figura 1.8.

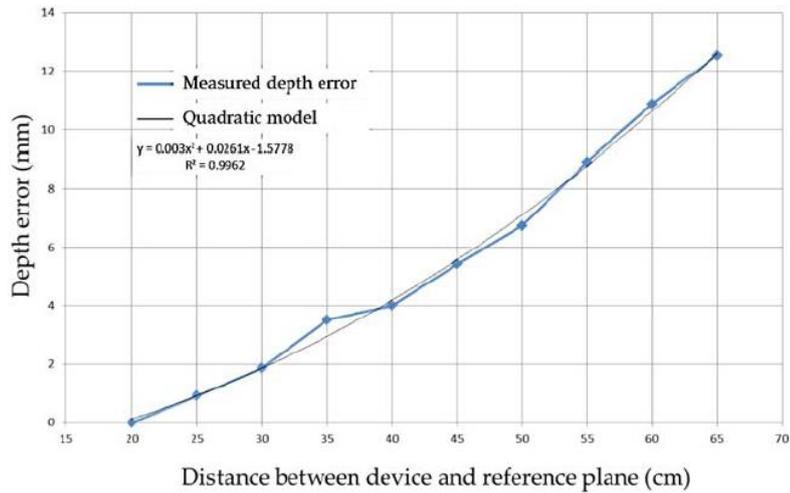


Figura 1.8 Relazione tra errore di profondità e distanza dal sensore di un riferimento piano [4]

Da questo studio si può affermare che, nonostante il dispositivo sia nato per applicazioni come il tracking, il gaming o il riconoscimento dei gesti, esso può anche essere impiegato in modo soddisfacente come scanner 3D, ovvero potrebbe essere indicato come dispositivo a basso costo per una serie di applicazioni di scansione 3D.

In linea con questo risultato, ci si aspetta un risultato analogo in questo lavoro di tesi.

1.3 Definizione di incertezza per strumenti di misura in ambito chirurgico.

In primo luogo, bisogna dare delle definizioni generali per comprendere l'uso degli indicatori che verranno descritti in seguito. In questo lavoro di tesi, si presentano le principali caratteristiche metrologiche degli strumenti di misura, facendo riferimento al "Vocabolario Internazionale di Metrologia" [5].

Ogni strumento di misura, nel nostro caso il sensore, è fortemente correlato all'intero complesso di misura che include: strumento, operatore, condizioni ambientali e misurando. Il sensore trasforma la grandezza fisica che vogliamo misurare in un'altra grandezza di natura diversa, in questo caso la grandezza fisica è la profondità, in modo tale da costruire la nuvola di punti che descrive il volto. L'output che si avrà è una matrice con m righe e n colonne, con elementi i valori dei pixel che indicano la profondità.

Le principali caratteristiche metrologiche degli strumenti di misura sono:

- **Risoluzione:** La risoluzione costituisce il più piccolo incremento di misura leggibile sulla scala dello strumento.
- **Sensibilità:** il rapporto tra il valore della grandezza in uscita e quello della grandezza in ingresso.
- **Stabilità:** rappresenta la capacità di uno strumento di dare misure costanti nel tempo.
- **Precisione:** la capacità di uno strumento di fornire risultati concordi in misure ripetute, questa coinvolge anche il concetto di **ripetibilità**, la quale fornisce un'indicazione della dispersione dei risultati in condizioni strettamente controllate e quello di **riproducibilità**, la quale fornisce un'indicazione della dispersione dei risultati in condizioni non strettamente controllate.
- **Accuratezza:** definisce la capacità dello strumento di fornire misure prossime al valore di riferimento. Essa è il risultato dell'operazione di taratura, ovvero del confronto dello strumento con un campione di riferimento.
- **Incertezza:** definita nel Vocabolario Internazionale di Metrologia (VIM) [5] come parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori che sono attribuiti a un misurando, sulla base delle informazioni utilizzate.

L'incertezza include effetti di natura sistematica ed effetti di natura accidentale, dopo che sono state eliminate tutte le cause d'errore.

Quindi l'errore di misura è il valore misurato di una grandezza rispetto al valore di riferimento di tale grandezza. Esso si divide in errore sistematico, cioè il componente dell'errore di misura che in presenza di misurazioni ripetute rimane costante o varia in maniera prevedibile, ed errore casuale, ovvero componente dell'errore di misura che in presenza di misurazioni ripetute varia in maniera non prevedibile.

Gli errori sistematici possono essere successivamente corretti, compensati ed eliminati. Invece gli errori casuali non sono prevedibili in modo deterministico, ma si possono gestire con metodi statistici basati sull'ipotesi di normalità dei dati raccolti dovuti a questi errori.

Per trovare l'incertezza, esistono due metodi principali [6]. Valutazione dell'incertezza basata su metodi statistici (categoria A), o su metodi non statistici (categoria B).

Le due tipologie sono volte a trovare il valore della varianza da associare ad ogni fattore. Le due categorie non sono legate all'oggetto della misurazione o alle grandezze fisiche coinvolte, ma solo al metodo utilizzato per la valutazione.

Altra nozione importante per comprendere il risultato di questo lavoro è l'incertezza estesa. Essa è il risultato della moltiplicazione tra l'incertezza tipo e il fattore di copertura, il quale dipende dal livello di fiducia che si vuole adottare (per esempio il 95% del livello di fiducia coincide con $k=2$).

Dopo aver introdotto queste nozioni basi, essenziali per la comprensione del testo, bisogna entrare nel campo chirurgico per capire quale sia l'incertezza adatta a questo campo.

Ci troviamo nel campo della chirurgia maxillo-facciale, cioè una specialità medico-chirurgica che si occupa di tutte le operazioni mirate alla cura di vari tipi di patologia e di problemi estetico-funzionali della faccia e dello scheletro facciale.

La chirurgia-maxillo facciale [7] è quella branca medico-chirurgica specializzata nella diagnosi e nel trattamento delle malattie e degli infortuni che riguardano il cranio, il viso, la bocca, la mascella, la mandibola e il collo.

Per individuare l'ordine dell'incertezza ammissibile in questo campo, bisogna prima capire quale sia il campo d'azione e cosa comprende:

- operazioni di chirurgia dento-alveolare, come per esempio l'estrazione di denti cariati per i quali non esiste alcuna possibilità di recupero, la rimozione di denti, l'estrazione di denti non più vitali, l'installazione di protesi dentarie, l'installazione di impianti dentari o la cura di granulomi dentali e ascessi dentali;
- rimozione e biopsie di cisti o tumori presenti sul volto;
- operazioni di chirurgia estetica del viso, per esempio al naso, orecchie, bocca, occhi, ecc.
- cura delle fratture della mandibola o della mascella;
- operazioni di chirurgia che hanno per oggetto l'articolazione tempero-mandibolare;
- operazioni per la modifica delle forme e delle dimensioni delle ossa facciali;
- operazioni di chirurgia ortognatica, cioè la cura delle principali anomalie e disfunzioni della mascella;
- operazioni di ricostruzione chirurgia di parti del volto, come labbra, zigomi, ecc.
- riparazione di malfunzionamenti congenite della bocca, come il labbro leporino, la cheiloschisi, labioschisi, la palatoschisi o la labiopalatoschisi;
- riparazioni di anomalie congenite della volta cranica, come la craniosinotosi;

Per la maggior parte di queste operazioni l'aiuto di uno scanner 3D può diventare essenziale per la riuscita dell'intervento. Infatti, l'analisi del volto e delle caratteristiche morfologiche nella fase di pre-intervento aiuta il chirurgo a comprendere meglio come intervenire. Quindi diventa molto importante che il modello 3D acquisito tramite scanner non abbia errori troppo grandi, tali da poter compromettere l'operazione.

Tutte queste operazioni sono molto importanti sia dal punto di vista funzionale che estetico. Quindi l'incertezza in questo campo non può ammettere valori dell'ordine del centimetro, infatti questi potrebbero portare a difetti estetici visibili nel post-operazione e nel caso più grave problemi funzionali delle parti interessate.

ammette valore che siano nell'ordine di grandezza del millimetro e non oltre. Infatti, un errore dell'ordine del centimetro potrebbe essere ben visibile all'occhio umano e inoltre, ancor più grave, potrebbe compromettere la funzione della parte interessata.

2. Metodologia

In questo capitolo, si descrive il metodo utilizzato in questo lavoro di tesi. Si inizia con la descrizione degli esperimenti, cioè dai video acquisiti tramite l'SR300 fino all'acquisizione dei frame per l'analisi. Dopo aver ottenuto tutti i frame nelle varie condizioni, si passa all'elaborazione dei dati attraverso il software Matlab per il calcolo degli indicatori, in Appendice A alcuni esempi dei codici utilizzati. Ottenuti gli indicatori e fatti gli opportuni calcoli, si applicano ad essi i test statistici adatti per l'estrazione dei risultati finali, che saranno descritti nel capitolo successivo.

2.1 Descrizione esperimenti

Per avere a disposizione un set di dati da elaborare e analizzare, si sono acquisiti, tramite il sensore, i video di tre individui, in due condizioni di luce e a quattro distanze differenti. Quindi i fattori presi in considerazione sono tre: individuo, luce, distanza.

Per il fattore individuo sono stati acquisiti i video di tre persone, che verranno chiamati per semplicità: Individuo_1, Individuo_2, Individuo_3.

Oltre al fattore individuo, c'è anche la condizione al contorno, infatti le riprese sono state fatte in condizioni di buio e di luce, così da poter constatare la significatività della luce nella fase di analisi dei dati.

Ultimo fattore è la distanza, fissata a 25 cm, 40 cm, 55 cm e 70 cm dal sensore, considerando come punto di riferimento la punta del naso di ogni individuo.

Per una migliore comprensione delle condizioni durante la ripresa dei video si veda la Figura 2.1, dove sono mostrate le otto condizioni per l'Individuo 1. Lo stesso vale anche per i rimanenti due individui.

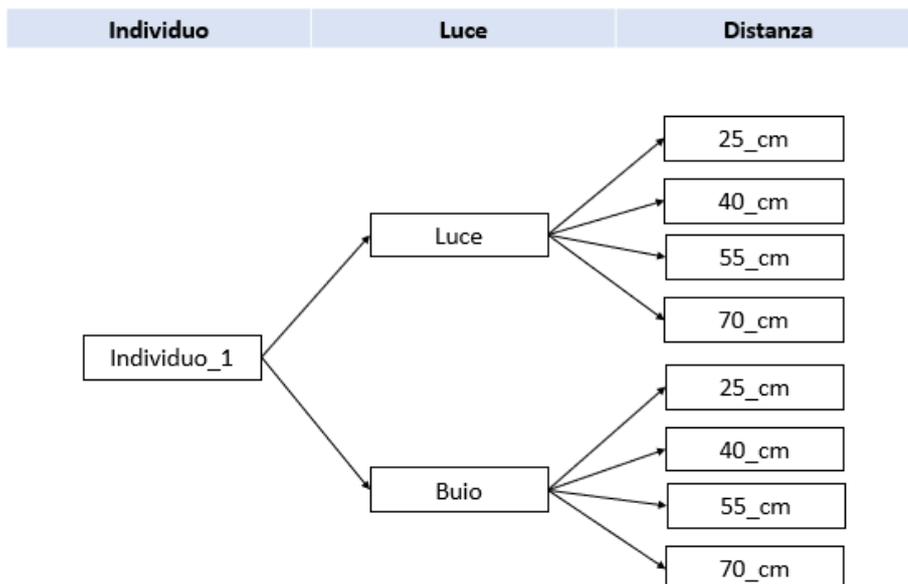
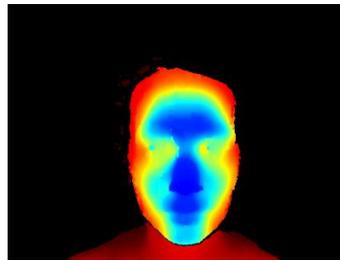


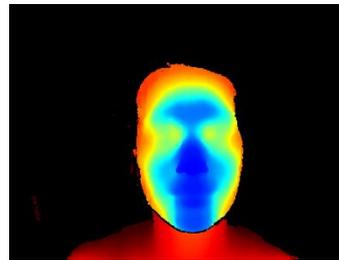
Figura 2.1 Le otto condizioni dell'Individuo_1

Per ogni condizione è stata acquisita, tramite il sensore, una registrazione di dieci secondi. Ogni secondo contiene trenta frame.

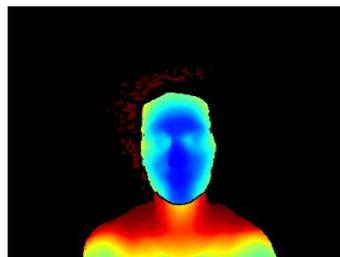
In Figura 2.2 si mostra un esempio di frame acquisito per ogni condizione dell'Individuo_1.



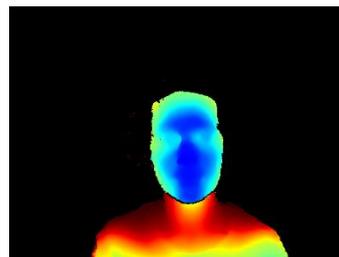
Individuo_1_buio_25cm



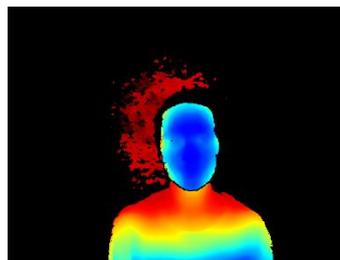
Individuo_1_luce_25cm



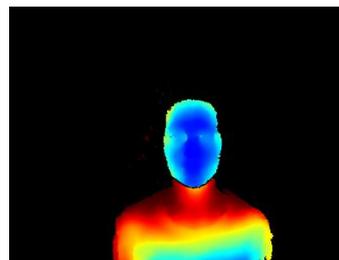
Individuo_1_luce_40cm



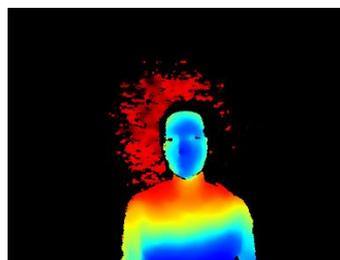
Individuo_1_luce_40cm



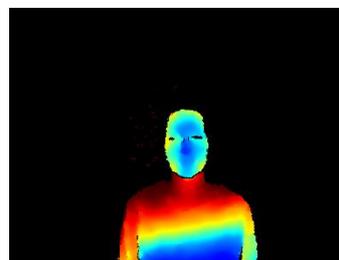
Individuo_1_luce_55cm



Individuo_1_luce_55cm



Individuo_1_luce_55cm



Individuo_1_luce_70cm

Figura 2.2 Nella colonna sinistra i frame dei video acquisiti per l'Individuo_1 in condizioni di buio e nella colonna destra i frame acquisiti sempre per lo stesso individuo ma in condizioni di luce

2.2 Workflow

Dopo aver acquisito i video per tutti gli individui, si passa alla selezione dei trenta frame per ogni condizione, così da poter utilizzare la statistica basata sulla distribuzione normale. Il quindicesimo frame, cioè quello centrale, è stato scelto secondo un criterio qualitativo, cioè il frame ritenuto migliore. Per migliore si intende quel frame che visivamente ha meno punti non misurati, per poi scegliere anche i precedenti quattordici frame e i successivi quindici. Il salvataggio dei frame è stato fatto attraverso il software Intel RealSense Viewer in formato “raw” in modo da poter essere facilmente elaborato con il software Matlab, in Figura 2.3 un esempio.

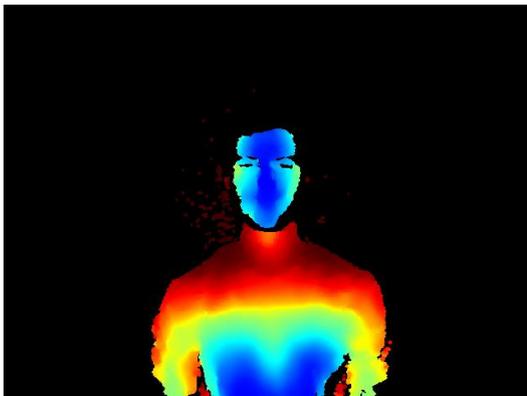


Figura 2.3 Individuo_2_buio_70_cm

Si nota come all’aumentare della distanza, aumentano anche i punti non misurati. Infatti, nella figura sopra riportata, la parte contenente gli occhi e le sopracciglia è indefinita.

Il passo successivo è stato quello di “pulizia” dei frame, con l’eliminazione tramite un algoritmo su Matlab di busto, collo e tutto ciò che c’è dietro alle orecchie, in modo tale da ottenere solo i punti acquisiti del volto. Dopo l’operazione di pulizia si passa al taglio manuale, per ottenere un’immagine più piccola e ridimensionata, dove tutti gli elementi che stanno dietro le orecchie vengono convertiti in valore indefiniti (*NaN* in *Matlab*). Queste immagini verranno chiamate “crop”, in quanto ritagliate. In figura 2.4 si mostra il passaggio dall’input (il frame integrale) all’output (l’immagine pulita e ridimensionata).



Figura 2.4 A sinistra il frame originale di Individuo_3_buio_70cm_1587736756128, a destra il crop elaborato

Dopo questa fase preparatoria di pulizia, si hanno per ognuna delle ventiquattro condizioni, trenta crop ridimensionati e puliti.

Finita questa prima fase di pulizia, si eseguono due operazioni su ogni crop, quella di taglio e di ridimensionamento delle matrici di ogni crop.

A ciascuno di essi corrisponde una matrice con “m” numero di righe, “n” di colonne e con elementi della matrice il valore che ha assunto il pixel in quella determinata condizione, quando il sensore non è riuscito a identificare il punto oppure è al di là delle orecchie, l’elemento della matrice prende il nome di NaN (Not a number).

L’operazione di taglio si esegue per eliminare righe e colonne che contengono interamente valori non misurati (Not a Number) in alto, in basso, a destra e a sinistra del volto, così da poter avere un indicatore sintetico sui NaN meno distorto. In questo modo il set di trenta matrici per ogni condizione avrà dimensione diversa, ma questo rende l’analisi dei dati più complicata. Così si ricorre ad un’altra operazione che è quella del ridimensionamento. Per ridimensionare i crop, si individua prima, per ogni set di condizione il numero massimo di righe (R_{max}) e colonne (C_{max}) delle matrici, così da poterle dimensionare secondo R_{max} e C_{max} . Quindi ad ogni crop si aggiungono righe e colonne di NaN, così che tutti crop abbiano la stessa dimensione. Per l’aggiunta delle righe si è scelto di iniziare ad aggiungere partendo dalla prima riga e poi alternare aggiungendo l’ultima, stessa procedura per le colonne, prima si aggiunge la prima colonna e poi l’ultima e così via ripartendo dalla prima.

Questo passaggio è molto importante per poter elaborare i crop, soprattutto per il calcolo della varianza.

Dopo aver eseguito l’operazione di taglio e ridimensionamento, c’è un’altra operazione che precede il calcolo degli indicatori: la trasformazione da coordinate locali in coordinate assolute, cioè metriche. A questo punto le informazioni che si hanno riguardano solo il valore del pixel. Per far questo si ricorre ad un algoritmo su Matlab che trasforma ogni matrice in una matrice a tre colonne e $n*m$ righe. La prima colonna rappresenta la direzione x, la seconda la direzione y e la terza quella delle z. Gli elementi di questa matrice contengono il valore in metri delle rispettive coordinate.

Ottenute le informazioni sulle coordinate metriche si passa alla generazione della nuvola di punti, cioè la creazione della nuvola di punti a partire dalle coordinate metriche precedentemente trasformate. Questo passaggio è necessario per poter effettuare la successiva registrazione delle immagini. Nella figura 2.5 viene mostrato il risultato che si ottiene applicando l’algoritmo del pointCloud tramite il software Matlab, si nota come si crea una nuvola di punti nello spazio, quindi tridimensionale.

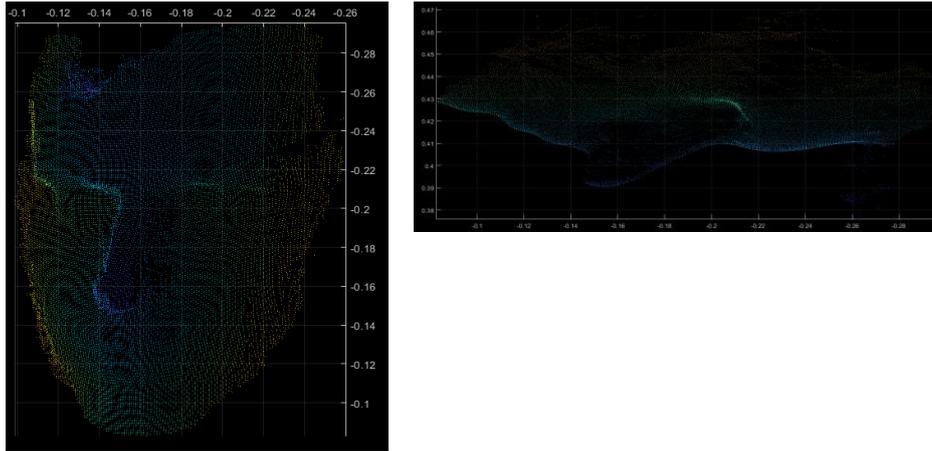


Figura 2.5 Point Cloud del quindicesimo crop di Individuo_3_buio_40 cm

Il passo successivo è stato quello di registrare i trenta crop, fissando il quindicesimo, attraverso l'algoritmo Iterative Closest Point (ICP).

Questo algoritmo è uno degli algoritmi di scan matching maggiormente utilizzati e si basa sull'associazione di corrispondenze punto a punto. Si tratta di un algoritmo iterativo dove per prima cosa si calcolano le corrispondenze tra le scansioni che si vogliono confrontare e successivamente si minimizza l'errore di distanza per computare lo scarto fra le scansioni. Secondo tale criterio, ogni immagine sarà ruotata e traslata rispetto al crop di riferimento, in questo caso rispetto al quindicesimo.

Effettuata la registrazione, si dividono le colonne di ogni matrice, in modo da ottenere una matrice con le coordinate metriche in x, una matrice con le coordinate metriche in y e una matrice con le coordinate metriche in z. In sintesi si otterranno trenta matrici per ogni direzione con le coordinate metriche di ogni crop registrato.

A questo punto si hanno tutti i dati necessari per il calcolo degli indicatori p e delle matrici MSE, questo però sarà descritto nel capitolo seguente.

Dopo questa elaborazione dei dati fatta sui crop, si è passati al calcolo dell'incertezza di posizionamento dei landmark.

In questa tre operatori (Operatore_1, Operatore_2 e Operatore_3) hanno posizionato cinque landmark in condizioni di luce e a distanza di venticinque e cinquanta centimetri dal sensore considerando sempre tre individui (Individuo_1, Individuo_2, Individuo_3). I dati in input si differenziano rispetto a quelli precedenti, infatti per ogni condizione si hanno tre immagini su cui gli operatori posizionano i landmark e si aggiunge il fattore Operatore.

Come detto precedentemente i landmark applicati sono cinque: alare destro, alare sinistro, nasion, pronasale e subnasale.

Per ognuno di questi landmark, sono state fatte le trasformazioni in coordinate metriche, con lo stesso algoritmo applicato precedentemente sui crop, e sono stati estrapolati gli MSE relativi ad ogni direzione di ciascun landmark.

In figura 2.6 un esempio di posizionamento dei landmark per lo stesso frame, ma fatto dai tre operatori.

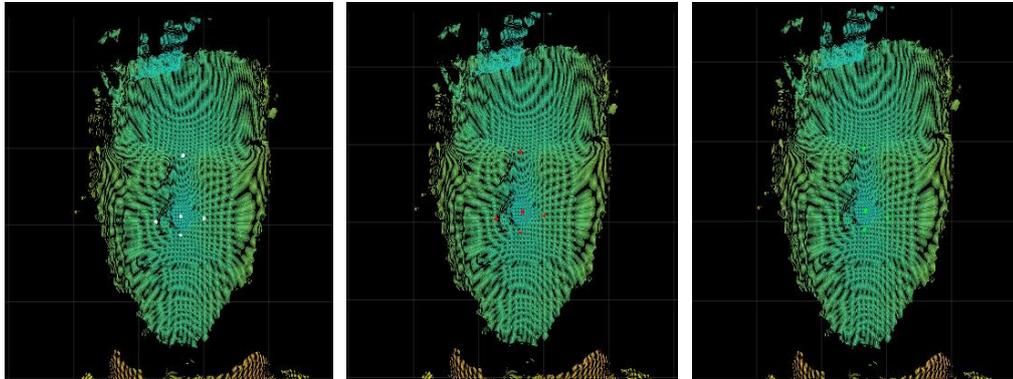


Figura 2.6 In ordine da sinistra a destra i landmark posizionati da Operatore_1, Operatore_2 e Operatore_3 sul frame Individuo_2_luce_25cm

Avendo ottenuto tutte le coordinate metriche e gli MSE relativi a quei punti, si può passare ai calcoli per la propagazione dell'incertezza durante il landmarking.

A questo punto, si hanno a disposizione tutti gli elementi per poter procedere nei calcoli.

2.3 Metodi statistici e indicatori

In questa sezione si descrivono i metodi statistici e gli indicatori utilizzati per verificare l'influenza dei vari fattori. Si utilizza il testo "Metodi Statistici per la sperimentazione" di Vicario e Levi [8]. Si inizia con l'indicatore sintetico p , il quale dà informazione sulla porzione di punti indefiniti per ogni crop calcolato subito dopo la fase di taglio. Per questo indicatore si calcolano gli intervalli di fiducia, in modo tale da poter analizzare la significatività della condizione al contorno, della distanza e dell'individuo.

Si continua con il calcolo dei Mean Square Error medi, che vengono effettuati dopo l'operazione di ridimensionamento e registrazione. A questi indicatori vengono effettuati test di Fisher sulle varianze per poter individuare un fattore significativo.

Infine, si passa al calcolo dell'incertezza del landmarking, dove si considerano i singoli landmark nelle tre dimensioni e si verifica se l'operatore, che fissa il landmark manualmente, è significativo o meno.

A titolo di esempio si riportano le tabelle di test d'ipotesi in Appendice B.

2.3.1 Indicatore sintetico \bar{p}

Il primo passo è il calcolo di p_i . Quest'ultimo ci dà informazioni sulla proporzione di punti non misurati (NaN) presenti in ogni immagine salvata e tagliata precedentemente, quindi la dimensione di ogni immagine è differente per ogni set di trenta crop presi in considerazione. La formula utilizzata è molto semplice:

$$p_i = \frac{\text{numero di elementi NaN}}{\text{numero di elementi totali}} \quad (1)$$

Per numero di elementi di NaN si intende il numero di punti non misurati all'interno di ogni matrice, invece per numero di elementi totali, il numero di punti totali di ogni matrice dato dalla moltiplicazione delle righe per le colonne. Quindi, più alto sarà il valore dell'indicatore p , più elevato sarà il numero di punti non misurati presenti nel crop dopo la fase di pulizia e taglio.

Per ogni stimatore p_i si calcola anche la varianza relativa alla matrice presa in considerazione come segue:

$$\text{var}[p_i] = \frac{p_i * (1 - p_i)}{n} \quad (2)$$

Dove n è il numero di punti totali del crop. Ottenuti i trenta p_i e $\text{var}[p_i]$, per ogni condizione si può calcolare la p media relativa alla condizione e la sua varianza.

La media si può calcolare come la so la formula della media aritmetica:

$$\bar{p} = \frac{\sum_1^{30} p_i}{30} \quad (3)$$

Invece la varianza viene calcolata come segue:

$$s^2 = s_W^2 + s_B^2 \quad (4)$$

Dove s_W^2 è la varianza interna ai gruppi (o varianza within), che è la media ponderata delle varianze dei singoli gruppi, invece s_B^2 è la varianza tra i gruppi (o varianza between), che è la varianza delle medie dei singoli gruppi dalla media del miscuglio.

Rispetto alla teoria, si è fatta una piccola approssimazione, infatti non si è considerata la media pesata rispetto alla numerosità di ogni crop, ma i calcoli sono stati eseguiti approssimando che la numerosità sia uguale all'interno di ogni set di trenta crop. Questa approssimazione è stata possibile perché la numerosità delle matrici di ogni set di condizione si differisce al massimo del 5%, valore che si può ritenere trascurabile.

Applicando le formula (3) e (4) si ottengono le medie \bar{p} e le rispettive varianze, per ognuna delle ventiquattro condizioni. Con questi dati si passa al calcolo degli intervalli di fiducia al 95%.

Gli intervalli di fiducia si calcolano come:

$$(L_i, L_S) = \left(\bar{p} - t_{30, 0,975} * \sqrt{s^2}, \bar{p} + t_{30, 0,975} * \sqrt{s^2} \right) \quad (5)$$

Dove \bar{p} e s^2 sono state descritte precedentemente, invece $t_{30, 0,975}$ è la t di Student con trenta gradi di libertà e livello di fiducia al 95%.

Gli intervalli si utilizzano per avere una valutazione qualitativa, infatti con questi si può intuire graficamente quali fattori possono essere significativi o meno.

Per la verifica qualitativa, si svolgono i test ipotesi sulle otto medie ottenute precedentemente, analizzandole a coppia.

Si ricorre ai test di ipotesi sulle proporzioni di due popolazioni:

$$H_0: p_1 = p_2$$

$$H_A: p_1 \neq p_2$$

Dove H_0 è l'ipotesi nulla, quindi sta a indicare che le due proporzioni si possono ritenere uguali e la loro differenza non è significativa al 95%. L'ipotesi alternativa H_A , invece, viene formulata in contrasto con l'ipotesi nulla.

L'ipotesi nulla può essere scritta come una differenza tra due popolazioni, essendo la differenza di due variabili casuali asintoticamente normali e indipendenti, essa segue una distribuzione normale, con:

$$\text{media} = p_1 - p_2 \quad (6)$$

$$\text{varianza} = s_1^2 + s_2^2 \quad (7)$$

Con media e varianza è possibile calcolare la z_{calc} che ci permette di confrontarla con $z_{1-\alpha/2}$, se $|z_{\text{calc}}| > z_{1-\alpha/2}$ l'ipotesi nulla viene rifiutata a favore di quella alternativa. Per il calcolo di z_{calc} si utilizza la seguente formula.

$$z_{\text{calc}} = \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}} \quad (8)$$

Il valore di $z_{1-\alpha/2}$ è estrapolato dalle tavole della normale e vale 1,96.

Così facendo si avranno 276 confronti a coppie, perché ogni condizione si confronterà con tutte le altre. Per rendere il risultato meglio comprensibile, è stata costruita una matrice, di dimensioni 24x24, che corrispondono alle condizioni, dove all'interno di ogni cella si inserisce l'informazione sull'accettare o meno l'ipotesi che le due medie siano da considerarsi uguali, cioè se la differenza tra le due condizioni sia significativa o meno. Nel caso in cui le due condizioni siano da considerarsi diversi con un livello di fiducia del 95%, si inserisce nella casella relativa a quella coppia di condizioni la dicitura "no" con la casella evidenziata in rosso, invece nel caso contrario, cioè nel caso in cui i due valori non si possano ritenere significativamente diversi ad un livello di fiducia del

95%, si inserisce la dicitura “compreso” con la casella evidenziata in azzurro. Questo è stato fatto per rendere l’informazione sui test d’ipotesi più chiara.

Inoltre, la tabella è stata compilata solo nella parte inferiore, infatti si è evitato di completare la parte superiore che avrebbe dato informazioni ridondanti, visto che confrontare la differenza tra p_1 e p_2 o confrontare la differenza tra p_2 e p_1 porta alla stessa conclusione.

Di seguito, si mostra un esempio delle tabelle utilizzate per il confronto fra le varie condizioni. Nell’esempio riportato in tabella 2.1 si deduce, ad esempio, che la condizione 1 si può considerare diversa, ad un livello di fiducia del 95%, dalla condizione 3,4, e 5.

	cond. 1	cond. 2	cond. 3	cond. 4	cond. 5	cond.6
cond. 1	-					
cond. 2	compreso	-				
cond. 3	no	compreso	-			
cond. 4	no	compreso	no	-		
cond. 5	no	no	no	no	-	
cond. 6	compreso	compreso	compreso	compreso	no	-

Tabella 2.1 Esempio di tabelle per il confronto del test d’ipotesi

2.3.2 Mean Square Error

Dopo aver effettuata la registrazione, si ha un set di trenta matrici registrate per ogni direzione (x,y,z) rispetto alla quindicesima utilizzata come riferimento. Con queste trenta matrici, per ogni direzione, si può calcolare l'errore della registrazione lungo ogni direzione, cioè lo Square Error (SE), la somma del quadrato delle distanze tra il risultato della registrazione e il valore di riferimento, cioè il quindicesimo.

Considerando la direzione X, L'SE si calcola come segue:

$$SE_x = \sum_1^{30} (\text{Valore pixel } x \text{ post reg} - \text{Valore pixel } x \text{ di rif})^2 \quad (9)$$

In questo caso si avrà una matrice con la stessa dimensione delle trenta matrici prese in considerazione e come elementi gli Square Error riferiti a ciascun pixel. Quindi ad esempio l'elemento posizionato in riga cento e colonna quaranta avrà come contenuto l'SE relativo al calcolo effettuato in quella posizione.

Adesso, si calcola il Mean Square Error:

$$MSE_x = \frac{SE_x}{\text{numero di pixel contententi un valore}} \quad (10)$$

Al numeratore c'è il valore calcolato tramite la formula (9), invece per il calcolo del denominatore si considera il numero di pixel contenenti un valore relativi a quella posizione in tutte e trenta le matrici. Ad esempio, si considera l'elemento posizionato in riga cento e colonna quaranta in tutte e trenta le matrici, questo potrebbe assumere il valore di NaN, quindi se su trenta elementi ci sono due valori di NaN, il denominatore prenderà il valore di ventotto, invece se tutti sono diversi da NaN, il denominatore sarà trenta. Questo viene fatto per avere un indicatore non distorto dai valori di NaN.

Quindi si ottiene una matrice della stessa dimensione dei crop ridimensionati per ogni set di trenta, avente come elementi i Mean Square Error relativi a quella posizione e alla direzione x.

Dalla formula (10) si ottiene, per ciascuna delle ventiquattro condizioni, una matrice con valori di MSE riguardanti la direzione x. Da questa matrice si può estrapolare un indicatore sintetico calcolato come la media dell'MSE di ciascuna matrice.

La media dell'MSE viene calcolata con al seguente formula:

$$MediaMSE_x = \frac{\sum_1^m \sum_1^n MSE_i}{\text{numero di elementi non NaN}} \quad (11)$$

Dove al numeratore c'è la sommatoria di tutti gli elementi della matrice MSE, invece al denominatore il numero di elementi che in quella matrice non è NaN. Al denominatore vengono scorporati i valori di Not a Number per non avere un indicatore distorto, come fatto precedentemente.

Così si ottengono ventiquattro indicatori sintetici dell'errore nella direzione x che possono essere confrontabili tra di loro.

Si ripete questa procedura per le altre direzioni, y e z, così da ottenere anche per queste direzioni informazioni sull'errore della registrazione.

Calcolato l'errore per ogni condizione, si possono eseguire i primi confronti qualitativi attraverso i grafici a dispersione. Così da poterne analizzare il comportamento tra i vari individui, all'aumentare della distanza e valutare la differenza tra le acquisizioni fatte con condizione di luce e al buio.

Per avere un riscontro quantitativo, si ricorre al test di ipotesi sulle varianze di Fisher, considerando un livello di fiducia del 95%:

$$\begin{aligned} H_0: s^2_1 &= s^2_2 \\ H_A: s^2_1 &\neq s^2_2 \end{aligned}$$

Dove H_0 è l'ipotesi nulla, quindi sta a indicare che le due varianze si possono ritenere uguali e la loro differenza non è significativa al 95%. L'ipotesi alternativa H_A , invece, viene formulata in contrasto con l'ipotesi nulla.

L'ipotesi nulla può essere scritta come:

$$H_0: \frac{s^2_1}{s^2_2} = 1$$

La statistica da usare è Fisher e si calcola F_{calc} con la seguente formula:

$$F_{calc} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (12)$$

La regione di rifiuto dell'ipotesi nulla è costituita da quei valori di F_{calc} tali per cui F_{calc} è minore di $F_{29,29,0,025}$ oppure F_{calc} è maggiore di $F_{29,29,0,975}$.

In altre parole, l'ipotesi nulla è da rifiutare quando F_{calc} è sufficientemente diverso da uno, dove il sufficientemente diverso va valutato in termini di significatività, nel nostro caso al 95%.

I valori di $F_{29,29,0,025}$ ed $F_{29,29,0,975}$ sono estrapolati dalle tavole di Fisher e valgono rispettivamente 0,58 e 2,101.

Così facendo si avranno 276 confronti a coppie, perché ogni condizione si confronterà con tutte le altre. Per rendere il risultato meglio comprensibile, come nel caso precedente, è stata costruita una matrice, di dimensioni 24x24, che corrispondono alle condizioni, dove all'interno di ogni cella si inserisce l'informazione sull'accettare o meno l'ipotesi che le due varianze siano da considerarsi uguali, cioè se la differenza tra le due condizioni sia significativa o meno. Nel caso in cui le due condizioni siano da considerarsi diversi con un livello di fiducia del 95%, si inserisce nella casella relativa a quella coppia di condizioni la dicitura "no" con la casella evidenziata in rosso, invece nel caso contrario, cioè nel caso in cui i due valori non si possano ritenere significativamente diversi ad un livello di fiducia del 95%, si inserisce la dicitura "compreso" con la casella evidenziata in azzurro. Questo è stato fatto per rendere l'informazione sui test d'ipotesi più chiara.

Inoltre, la tabella è stata compilata solo nella parte inferiore, infatti si è evitato di completare la parte superiore che avrebbe dato informazioni ridondanti, visto che confrontare il rapporto tra le due varianze porta alla medesima conclusione.

Il procedimento è analogo a quello utilizzato per l'indicatore delle proporzioni, ma cambia il test statistico.

2.3.3 Incertezza del landmarking

Come detto precedentemente, il posizionamento dei landmark è una fase delicata e ancora incerta per via della diversa conformazione dei volti tra vari individui. Quindi risulta difficile posizionare un landmark, anche seguendo delle regole molto precise.

In questo lavoro di tesi, si analizza un landmarking fatto manualmente da tre operatori, per trovare l'incertezza del posizionamento e la significatività dell'operatore, oppure se si è ad un livello tale che l'operatore nell'operazione di posizionamento dei landmark non è significativo.

Per questa analisi, per ciascuna condizione si hanno tre frame e le condizioni prese in considerazione sono sei: Individuo_1, individuo_2 e Individuo_3, con condizione al contorno di luce e a distanza di 25 e 55 cm.

Gli operatori che hanno posizionato i landmark sono tre: Operatore_1, Operatore_2 e Operatore_3.

Quindi per ogni condizione e in ciascuna delle tre immagini, si hanno tre posizionamenti diversi fatti dai tre operatori.

Per rendere tutto più comprensibile, si mostra in tabella 2.2 un esempio di posizionamento del landmark, l'alare destro nella direzione x, per le tre immagini nella condizione di Individuo_1_luce_25_cm eseguito dai tre operatori.

Alare_dx,x	Operatore_1	Operatore_2	Operatore_3
Frame 1	0,003201	0,002616	0,002029
Frame 2	0,004368	0,004368	0,003788
Frame 3	0,003207	0,002031	0,002619

Tabella 2.2 Esempio di struttura dati delle misure, Alare_dx direzione x

Inizialmente i valori delle dei landmark erano in pixel, poi sono state trasformate in coordinate metriche, in modo da poterle confrontare tra di loro e sfruttare anche i valori della varianza relativi a quel punto in tutte le tre dimensioni.

Infatti, il passo successivo è l'estrazione dei valori di MSE corrispondenti alla posizione del landmark. Per esempio se l'Operatore_1 posizionato il landmark Alare_dx direzione x nella coordinata m,n per la condizione Individuo_1_luce_25_cm, allora si va ad associare il valore corrispondente all'elemento m,n della matrice MSE relativa alla direzione x e per quella specifica condizione. In tabella 2.3 un esempio dei valori MSE estratti da Individuo_1_luce_25cm.

Alare_dx, x	Operatore_1	Operatore_2	Operatore_3
Frame 1	5,14E-08	5,22E-08	5,18E-08
Frame 2	4,73E-08	4,73E-08	4,85E-08
Frame 3	5,08E-08	5,13E-08	5,2E-08

Tabella 2.3 Esempio struttura dati dell'estrapolazione dell'MSE di Alare_dx, x

In questo modo, per ogni condizione, per ogni landmark e per ogni direzione di avranno sei misure e sei valori di incertezza, tre per ogni operatore.

Per avere un set di dati più grande, si applica il metodo Monte Carlo.

Il metodo Monte Carlo è un'ampia classe di metodi computazionali basati sul campionamento casuale per ottenere risultati numerici.

Il metodo è usato per trarre stime attraverso simulazioni. Si basa su un algoritmo che genera una serie di numeri tra loro non correlati, che seguono la distribuzione di probabilità che si suppone abbia il fenomeno da indagare.

La simulazione Monte Carlo calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame, con il peso proprio della probabilità di tale evenienza, cercando di esplorare in modo denso tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. Per applicare tale metodo si considera una distribuzione normale dei dati con media, la misura della coordinata posizionata in una immagine da un operatore, e varianza, l'MSE relativo a tale coordinata.

Per esempio, il landmark direzione x posizionato da Operatore_1 nel frame 1 di Individuo_1_luce_25cm segue una distribuzione normale con:

media	0,003201224
varianza	5,14254E-08

Si simulano, quindi, trenta misure casuali per ognuno delle misure effettuate, così si ottengono duecentosettanta simulazioni da analizzare.

Da qui, si prosegue con l'analisi della varianza (ANOVA) tramite il software Minitab, per verificare se il fattore operatore sia significativo o meno.

Dall'ANOVA si ricava per ogni condizione la somma dei quadrati totali e i gradi di libertà, così da poter ottenere la varianza totale con la seguente formula.

$$varianza\ totale = \frac{SS}{DF} \quad (13)$$

Così si hanno novanta varianze totali, relative ad ogni landmark, in ogni direzione, in tutte le condizioni.

Ottenuta la varianza totale si calcola l'incertezza estesa con un livello di fiducia del 95 % come segue:

$$\text{varianza totale} = \frac{SS}{DF} \quad (14)$$

Avendo ricavato l'incertezza estesa per tutte e novanta le condizioni, si può proseguire con l'analisi dei dati. Infatti, adesso si hanno a disposizione tutti i dati necessari per analizzare la significatività di tutti i fattori in gioco.

3. Risultati

Dopo aver discusso delle formule e dei test utilizzati nel capitolo precedente, in questo si mostrano i risultati ottenuti da tali calcoli. Si inizia con l'indicatore p, con l'analisi dei fattori significativi. Si prosegue con MSE, per capire oltre la significatività dei fattori, anche la criticità dell'errore oltrepassando una certa distanza. Infine, si conclude con l'incertezza del landmarking, dove ci si concentra sull'operatore, per comprendere se sia significativo.

3.1 Indicatore p

Dalla prima analisi fatta sull'indicatore p, si nota come mettendo in relazione i valori di p medio per ogni condizione con la distanza, questi hanno un andamento quadratico e il fattore luce, in prima analisi sembra non essere significativo. Invece il fattore individuo sembra essere significativo, visto che il grafico può essere diviso in tre parti, una per ogni individuo. L'Individuo_3 mostra le proporzioni p medie più alte sia in condizioni di luce che di buio, questo potrebbe essere spiegato dal fatto che l'individuo al momento della ripresa aveva la barba, la quale causa punti non misurati durante l'acquisizione. Invece quello la proporzione p media più bassa, con andamento analogo sia in condizioni di luce che di buio, è l'Individuo_1.

Leggermente diverso invece è l'andamento dell'Individuo_2, dove mostra delle eccezioni a distanza di 40 e 55 cm tra luce e buio.

I risultati del grafico a dispersione si possono consultare in figura 3.1.

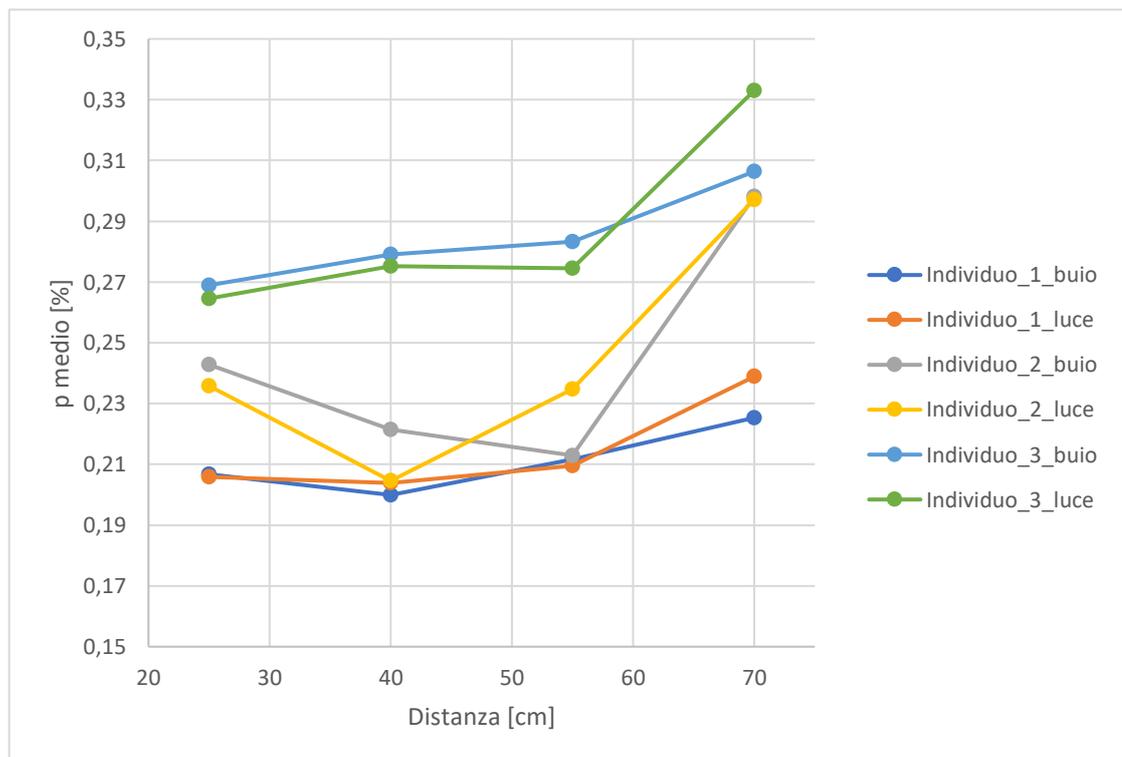


Figura 3.1 Grafico a dispersione: distanza vs media delle p

Questo grafico, tuttavia, non può dare un'informazione completa. Infatti, non tiene in considerazione la varianza delle proporzioni, così come descritto nel capitolo precedente. Per far ciò, si procede col calcolo della varianza, come somma di varianza interna i gruppi e varianza tra i gruppi, e con la costruzione degli intervalli di fiducia al 95% per comprendere se le supposizioni fatte precedentemente possono essere confermate o meno.

Dalla figura 3.2 si nota come i tre individui per la stessa distanza, hanno valori diversi e intervalli di fiducia che non coincidono, discorso diverso quando si analizza lo stesso individuo per una determinata distanza in condizioni di contorno diverse. Qui infatti, gli intervalli di fiducia sono sovrapposti, questo risultato rafforza il fatto che la condizione al contorno non è significativa. Invece il fattore individuo è significativo, dato che il grafico si mostra essere diviso in tre parti, con andamenti dipendenti dall'individuo. Da questo si evince come il fattore individuo sia significativo.

Si conferma, anche in questo grafico, l'affermazione precedente riguardante l'eccezione mostrata sull'Individuo_2 in condizioni di luce e buio a 40 e a 55 cm, qui infatti gli intervalli non coincidono.

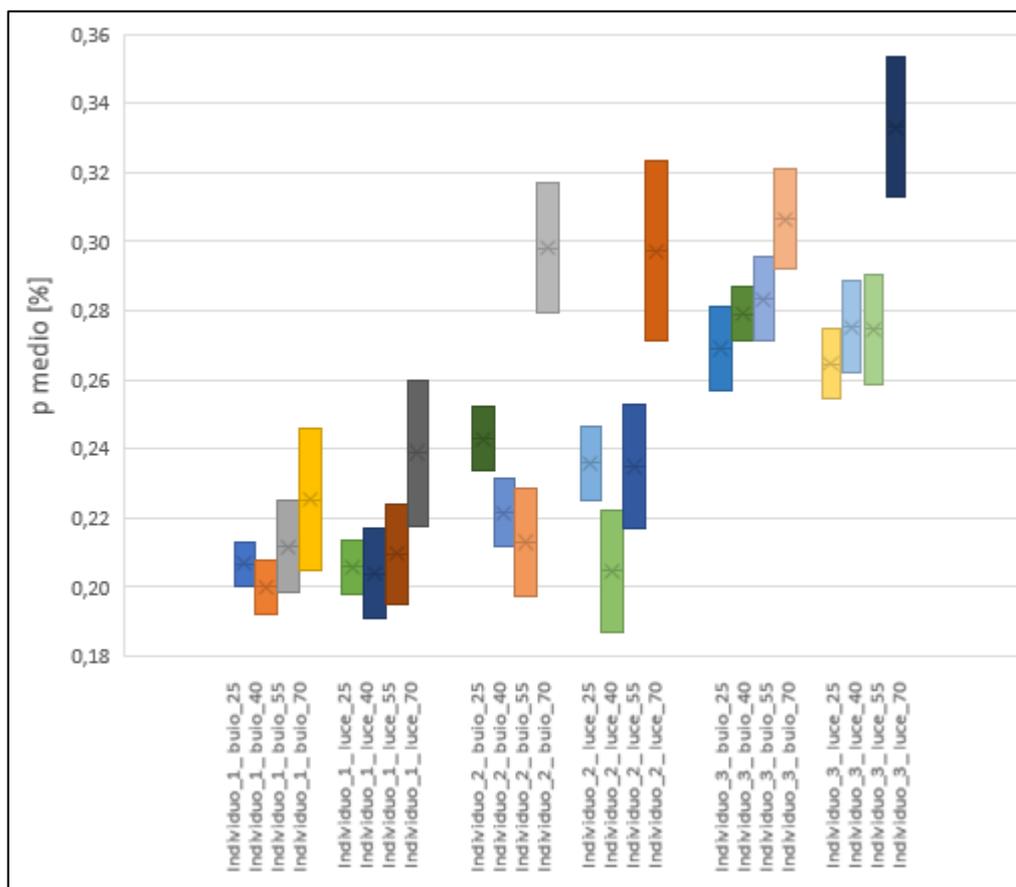


Figura 3.2 Intervalli di fiducia delle proporzioni p

Altro intervallo di fiducia non coincidente è per Individuo_3 a distanza di 70 cm. Qui si vede in modo più netto la differenza rispetto al grafico precedente. Anche in questo grafico l'andamento degli intervalli è quadratico, inoltre si nota come all'aumentare della distanza aumenta pure la varianza dell'indicatore.

Dopo aver fatto una serie di valutazioni qualitative, si verifica quanto detto attraverso i test di ipotesi sulle proporzioni, in modo da ottenere delle valutazioni quantitative.

Per prima cosa si va a testare la significatività del fattore individuo. Nella tabella 3.1 si nota come ad una distanza di 25 centimetri dal sensore, si può affermare l'individuo è significativo, invece la condizione al contorno no. Infatti, non risultano significative le differenze tra: Individuo_1 luce e buio, Individuo_2 luce e buio, Individuo_3 luce e buio

	Individuo_1_ buio_25	Individuo_1_ luce_25	Individuo_2_ buio_25	Individuo_2_ luce_25	Individuo_3_ buio_25	Individuo_3_ luce_25
Individuo_1_buio_25	-					
Individuo_1_luce_25	compreso	-				
Individuo_2_buio_25	no	no	-			
Individuo_2_luce_25	no	no	compreso	-		
Individuo_3_buio_25	no	no	no	no	-	
Individuo_3_luce_25	no	no	no	no	compreso	-

Tabella 3.1 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 25 cm

A distanza di 40 centimetri, vedi tabella 3.2, il risultato dei test è analogo al precedente con una eccezione sull'Individuo_2-luce, in cui la p media non risulta significativamente diversa da quella dell'Individuo_1 in entrambe le condizioni al contorno.

	Individuo_1_ buio_40	Individuo_1_ luce_40	Individuo_2_ buio_40	Individuo_2_ luce_40	Individuo_3_ buio_40	Individuo_3_ luce_40
Individuo_1_buio_40	-					
Individuo_1_luce_40	compreso	-				
Individuo_2_buio_40	no	no	-			
Individuo_2_luce_40	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_buio_40	no	no	no	no	-	
Individuo_3_luce_40	no	no	no	no	compreso	-

Tabella 3.2 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 40 cm

Si esamina il caso in cui l'individuo è a distanza di 55 cm, in tabella 3.3, qui si rispecchiano i risultati precedenti con l'individuo_2_buio unica eccezione. Infatti tra gli individui l'indicatore p è significativamente diverso, discorso diverso se si considerano gli stessi individui in condizioni al contorno differenti.

	Individuo_1_ buio_55	Individuo_1_ luce_55	Individuo_2_ buio_55	Individuo_2_ luce_55	Individuo_3_ buio_55	Individuo_3_ luce_55
Individuo_1_buio_55	-					
Individuo_1_luce_55	compreso	-				
Individuo_2_buio_55	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_55	no	no	compreso	-		
Individuo_3_buio_55	no	no	no	no	-	
Individuo_3_luce_55	no	no	no	no	compreso	-

Tabella 3.3 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 55 cm

L'ultima distanza è 70 cm, qui l'individuo mantiene la significatività, ma a differenza delle altre distanze le medie di p fra Individuo_3_luce e Individuo_3_buio non possono essere considerate uguali. Questa eccezione, rispetto all'andamento delle altre condizioni, è ben visibile nella figura 3.2 dove si vede chiaramente come i due intervalli non coincidono.

	Individuo_1_ buio_70	Individuo_1_ luce_70	Individuo_2_ buio_70	Individuo_2_ luce_70	Individuo_3_ buio_70	Individuo_3_ luce_70
Individuo_1_buio_70	-					
Individuo_1_luce_70	compreso	-				
Individuo_2_buio_70	no	no	-			
Individuo_2_luce_70	no	no	compreso	-		
Individuo_3_buio_70	no	no	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_70	no	no	no	no	no	-

Tabella 3.4 Test di ipotesi sulle proporzioni a distanza 70 cm

Confermato il fatto che l'individuo sia significativo anche dal punto di vista quantitativo, si passa all'analisi delle tabelle considerando gli intervalli per ogni individuo.

Dalla tabella 3.5 si nota che per l'Individuo_1, la condizione al contorno, come affermato precedentemente, non sia significativa. Infatti, basta esaminare i casi in cui l'individuo, posizionato alla stessa distanza, ma con condizione di luce diversa, dove il test d'ipotesi dice che la differenza tra le due medie non può essere considerata significativa, pertanto il fattore luce non influisce sul numero di punti non misurati.

È possibile notare come la maggior parte delle condizioni gli intervalli dell'Individuo_1 sono coincidenti, anche se con grandezze diverse, tranne per Individuo_1_luce_70_cm.

	Individuo_1_buio_25	Individuo_1_buio_40	Individuo_1_buio_55	Individuo_1_buio_70	Individuo_1_luce_25	Individuo_1_luce_40	Individuo_1_luce_55	Individuo_1_luce_70
Individuo_1_buio_25	-							
Individuo_1_buio_40	compreso	-						
Individuo_1_buio_55	compreso	compreso	-					
Individuo_1_buio_70	compreso	no	compreso	-				
Individuo_1_luce_25	compreso	compreso	compreso	compreso	-			
Individuo_1_luce_40	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_1_luce_55	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_1_luce_70	no	no	no	compreso	no	no	no	-

Tabella 3.5 test d'ipotesi sulle proporzioni di Individuo_1 buio e luce

Anche Individuo_2, la luce non è significativa, infatti osservando la tabella 3.6, si nota come la differenza tra le p riferiti alla stessa distanza, ma con condizioni al contorno differenti, siano non significative. Rispetto all'Individuo_1, la distanza diventa significativa, infatti si vede come ci sia una maggior densità di caselle rosse che indicano come la differenza tra le p sia significativa. L'unico che non mostra meno differenze al variare della distanza è Individuo_2 in condizioni di luce.

	Individuo_2_buio_25	Individuo_2_buio_40	Individuo_2_buio_55	Individuo_2_buio_70	Individuo_2_luce_25	Individuo_2_luce_40	Individuo_2_luce_55	Individuo_2_luce_70
Individuo_2_buio_25	-							
Individuo_2_buio_40	no	-						
Individuo_2_buio_55	no	compreso	-					
Individuo_2_buio_70	no	no	no	-				
Individuo_2_luce_25	compreso	no	no	no	-			
Individuo_2_luce_40	no	compreso	compreso	no	no	-		
Individuo_2_luce_55	compreso	compreso	compreso	no	compreso	no	-	
Individuo_2_luce_70	no	no	no	compreso	no	no	no	-

Tabella 3.6 Test ipotesi sulle proporzioni di Individuo_2 luce e buio

Per completare l'analisi del fattore luce, si osserva la tabella 3.7 con le informazioni sul test d'ipotesi effettuato per Individuo_3. Qui, la condizione al contorno è significativa solo a distanza di 70 cm, per il resto non è significativa, ulteriore constatazione sta nel fatto che l'Individuo_3 a distanza di 70 cm, sia in condizione di luce che di buio, diventa significativamente diverso rispetto agli altri. Questo rafforza la tesi che il sensore a partire dai 70 cm di distanza diventa meno affidabile in termini di accuratezza.

	Individuo_3_buio_25	Individuo_3_buio_40	Individuo_3_buio_55	Individuo_3_buio_70	Individuo_3_luce_25	Individuo_3_luce_40	Individuo_3_luce_55	Individuo_3_luce_70
Individuo_3_buio_25	-							
Individuo_3_buio_40	compreso	-						
Individuo_3_buio_55	compreso	compreso	-					
Individuo_3_buio_70	no	no	no	-				
Individuo_3_luce_25	compreso	no	no	no	-			
Individuo_3_luce_40	compreso	compreso	compreso	no	compreso	-		
Individuo_3_luce_55	compreso	compreso	compreso	no	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_70	no	-						

Tabella 3.7 Test ipotesi sulle proporzioni di Individuo_3 luce e buio

Quindi si può concludere, per quanto riguarda il numero di punti che il sensore riesce ad acquisire, che il fattore individuo è significativo, il fattore luce invece non lo è.

Discorso leggermente diverso è per la distanza i cui comportamenti non sono simili tra i vari individui, però si può affermare nella maggior parte dei casi il fattore distanza diventa significativo dai 55 centimetri in poi.

Si sottolinea l'andamento quadratico mostrato, sia nella figura del grafico a dispersione che in quella degli intervalli di fiducia e il fatto che la variabilità dell'indicatore, cioè l'ampiezza degli intervalli, aumenti all'aumentare della distanza.

3.2 Mean Square Error

Come descritto nel Capitolo 2, si calcolano le matrici del Mean Square Error per ciascuna delle ventiquattro condizioni e per tutte e tre le direzioni (x,y,z), si può calcolare l'indicatore sintetico della media dell'MSE. Si procede con lo stesso metodo utilizzato per l'indicatore p.

3.2.1 MSE direzione x

Per primo si analizza il grafico a dispersione. Si procede con ordine partendo con la direzione x, poi la y e infine la z.

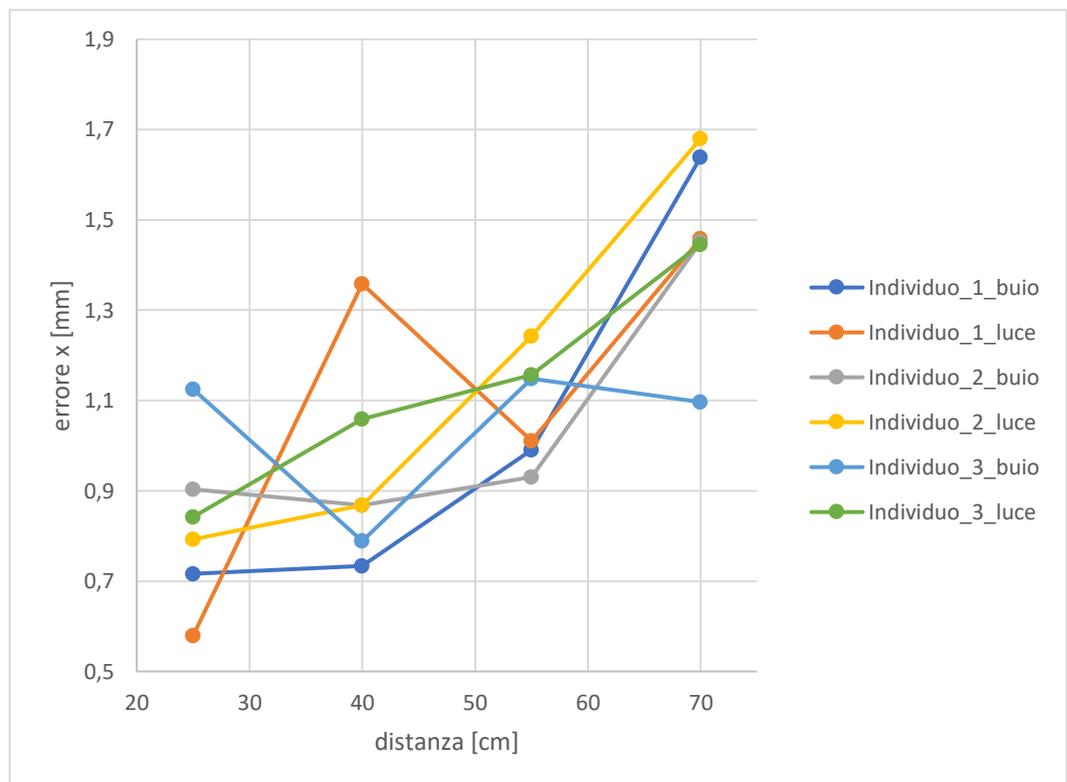


Figura 3.3 Grafico a dispersione: distanza vs errore x

Dalla figura 3.3, si nota come l'andamento dell'errore in direzione x sia prevalentemente quadratico ed è simile per tutti gli individui ed aumenta all'aumentare della distanza. Per la distanza di 25 cm l'errore si concentra tra 0.58 e 1.12 mm, invece a distanza di 40 cm il range più distribuito tra 0.73 e 1.36 mm, qui però l'individuo_1_luce ha un comportamento diverso rispetto al resto delle condizioni. Considerando la distanza di 55 cm dal sensore, vediamo l'errore molto concentrato tra 0.93 e 1.24 mm, per ultimo a distanza 70 mm l'errore è compreso tra 1.09 e 1.68 mm, con l'Individuo_3_buio che si stacca dal resto del gruppo.

Qualitativamente si possono osservare tre outlier (Individuo_3_buio a 25cm e a 70 cm, Individuo_1_luce_55cm), bisogna però approfondire l'analisi con i test di Fisher sulle MSE medie per le varie condizioni, in modo da ottenere anche una conferma dal punto di vista quantitativo. Infatti, con questi test si può confermare l'analisi qualitativa fatta sopra e individuare in modo più esatto i fattori significativi tra distanza, individuo e condizione al contorno.

Si inizia con la tabella 3.8 dove si mostrano i risultati dei test di ipotesi considerando la distanza a 25 cm in modo tale da testare la significatività dell'individuo. Si nota come, ad eccezione di Individuo_1_luce e Individuo_3_buio, la differenza tra i valori medi dell'MSE in direzione x non è significativa.

	Individuo o_1_ buio_25	Individuo o_1_ luce_25	Individuo o_2_ buio_25	Individuo o_2_ luce_25	Individuo o_3_ buio_25	Individuo o_3_ luce_25
Individuo_1_buio_25	-					
Individuo_1_luce_25	compreso	-				
Individuo_2_buio_25	compreso	no	-			
Individuo_2_luce_25	compreso	no	compreso	-		
Individuo_3_buio_25	no	no	compreso	no	-	
Individuo_3_luce_25	compreso	no	compreso	compreso	compreso	-

Tabella 3.8 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 25 cm

A distanza di 40 centimetri, vedi tabella 3.9, il fattore individuo rimane non significativo nella maggior parte dei casi con alcune eccezioni, evidenziate con le caselle rosse.

	Individuo o_1_ buio_40	Individuo o_1_ luce_40	Individuo o_2_ buio_40	Individuo o_2_ luce_40	Individuo o_3_ buio_40	Individuo o_3_ luce_40
Individuo_1_buio_40	-					
Individuo_1_luce_40	no	-				
Individuo_2_buio_40	compreso	no	-			
Individuo_2_luce_40	compreso	no	compreso	-		
Individuo_3_buio_40	compreso	no	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_40	no	compreso	compreso	compreso	no	-

Tabella 3.9 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 40 cm

Per quanto riguarda la distanza di 55 centimetri, il fattore individuo è significativo solo tra Individuo_2 luce e Individuo_2 buio, vedi tabella 3.10

	Individu o_1_ buio_55	Individu o_1_ luce_55	Individu o_2_ buio_55	Individu o_2_ luce_55	Individu o_3_ buio_55	Individu o_3_ luce_55
Individuo_1_buio_55	-					
Individuo_1_luce_55	compreso	-				
Individuo_2_buio_55	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_55	compreso	compreso	no	-		
Individuo_3_buio_55	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_55	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-

Tabella 3.10 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 55 cm

Infine, in tabella 3.11, si mostrano i risultati mantenendo fissa la distanza di 70 centimetri. Anche qui il fattore individuo non è significativo, come nei casi precedenti è presente qualche eccezione.

	Individu o_1_ buio_70	Individu o_1_ luce_70	Individu o_2_ buio_70	Individu o_2_ luce_70	Individu o_3_ buio_70	Individu o_3_ luce_70
Individuo_1_buio_70	-					
Individuo_1_luce_70	compreso	-				
Individuo_2_buio_70	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_70	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_buio_70	no	compreso	compreso	no	-	
Individuo_3_luce_70	compreso	compreso	compreso	compreso	no	-

Tabella 3.11 Test ipotesi per MSE direzione x per la distanza 70 cm

Dai test di Fisher si evince che considerando la stessa distanza l'individuo risulta generalmente non significativo, eccezione per quelle condizioni che abbiamo definito outlier precedentemente.

Per analizzare meglio il fattore luce, si mostrano i risultati dei test suddivisi per individuo. Dai risultati in tabella 3.12 si evince che la condizione al contorno non è significativa, tranne a distanza di 40 centimetri.

	Individu o_1_ buio_25	Individu o_1_ buio_40	Individu o_1_ buio_55	Individu o_1_ buio_70	Individu o_1_ luce_25	Individu o_1_ luce_40	Individu o_1_ luce_55	Individu o_1_ luce_70
Individuo_1_buio_25	-							
Individuo_1_buio_40	compreso	-						
Individuo_1_buio_55	no	no	-					
Individuo_1_buio_70	no	no	no	-				
Individuo_1_luce_25	compreso	compreso	no	no	-			
Individuo_1_luce_40	no	no	no	compreso	no	-		
Individuo_1_luce_55	no	no	compreso	no	no	compreso	-	
Individuo_1_luce_70	no	no	no	compreso	no	compreso	no	-

Tabella 3.12 Test ipotesi per MSE direzione x di individuo_1 luce e buio

Per l'Individuo_2 il risultato è il medesimo, con il fattore luce che non risulta significativo. Però è presente un'eccezione a distanza di 55 centimetri.

	Individu o_2_ buio_25	Individu o_2_ buio_40	Individu o_2_ buio_55	Individu o_2_ buio_70	Individu o_2_ luce_25	Individu o_2_ luce_40	Individu o_2_ luce_55	Individu o_2_ luce_70
Individuo_2_buio_25	-							
Individuo_2_buio_40	compreso	-						
Individuo_2_buio_55	compreso	compreso	-					
Individuo_2_buio_70	no	no	no	-				
Individuo_2_luce_25	compreso	compreso	compreso	no	-			
Individuo_2_luce_40	compreso	compreso	compreso	no	compreso	-		
Individuo_2_luce_55	no	no	no	compreso	no	no	-	
Individuo_2_luce_70	no	no	no	compreso	no	no	no	-

Tabella 3.13 Test ipotesi per MSE direzione x di individuo_2 luce e buio

Per l'Individuo_3, si veda la tabella 3.14, il fattore luce è significativo a 40 e 70 centimetri. Invece non si notano differenze tra 25 e 55 centimetri.

	Individu o_3_ buio_25	Individu o_3_ buio_40	Individu o_3_ buio_55	Individu o_3_ buio_70	Individu o_3_ luce_25	Individu o_3_ luce_40	Individu o_3_ luce_55	Individu o_3_ luce_70
Individuo_3_buio_25	-							
Individuo_3_buio_40	compreso	-						
Individuo_3_buio_55	compreso	no	-					
Individuo_3_buio_70	compreso	no	compreso	-				
Individuo_3_luce_25	compreso	compreso	compreso	compreso	-			
Individuo_3_luce_40	compreso	no	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_luce_55	compreso	no	compreso	compreso	no	compreso	-	
Individuo_3_luce_70	compreso	no	compreso	no	no	no	compreso	-

Tabella 3.14 Test ipotesi per MSE direzione x di individuo_2 luce e buio

In conclusione, si può affermare che il fattore al contorno per l'indicatore della media di MSE in direzione x non è significativo. Infatti, nella maggior parte dei casi.

Ultimo fattore da verificarne la significatività è la distanza. Visto che l'individuo e la luce non influiscono sul valore dell'errore, si va a constatare fino a quando la distanza è significativa. Dall'analisi si evince che non c'è particolare differenza tra i 25 e i 40 centimetri, ma dai 55 la differenza inizia a essere significativa.

Si mostrano i risultati dei test d'ipotesi con tutti gli individui e le condizioni al contorno, però considerando solo le distanze di 25 e 40 cm.

	Individu o_1_ buio_25	Individu o_1_ buio_40	Individu o_1_ luce_25	Individu o_1_ luce_40	Individu o_2_ buio_25	Individu o_2_ buio_40	Individu o_2_ luce_25	Individu o_2_ luce_40	Individu o_3_ buio_25	Individu o_3_ buio_40	Individu o_3_ luce_25	Individu o_3_ luce_40
Individuo_1_buio_25	-											
Individuo_1_buio_40	compreso	-										
Individuo_1_luce_25	compreso	compreso	-									
Individuo_1_luce_40	no	no	no	-								
Individuo_2_buio_25	compreso	compreso	no	no	-							
Individuo_2_buio_40	compreso	compreso	no	no	compreso	-						
Individuo_2_luce_25	compreso	compreso	no	no	compreso	compreso	-					
Individuo_2_luce_40	compreso	compreso	no	no	compreso	compreso	compreso	-				
Individuo_3_buio_25	no	no	no	compreso	compreso	compreso	no	compreso	-			
Individuo_3_buio_40	compreso	compreso	no	no	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_luce_25	compreso	compreso	no	no	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_40	no	no	no	compreso	compreso	compreso	no	compreso	compreso	no	compreso	-

Tabella 3.15 Test ipotesi per MSE x a distanza di 25 e 40 cm

Eliminando le condizioni prima definite come outlier, passando da 25 a 40 cm la distanza non è un fattore significativo. Quindi, per l'indicatore MSE medio in direzione x, si può concludere dicendo che l'individuo e la condizione al contorno non è significativa, invece per quanto riguarda la distanza essa diventa significativa dopo i 40 cm e il valore dell'errore cresce molto raggiunti i 70 cm.

3.2.2 MSE direzione y

Si prosegue con la stessa modalità precedente, andando a costruire il grafico a dispersione, come mostrato in figura 3.4.

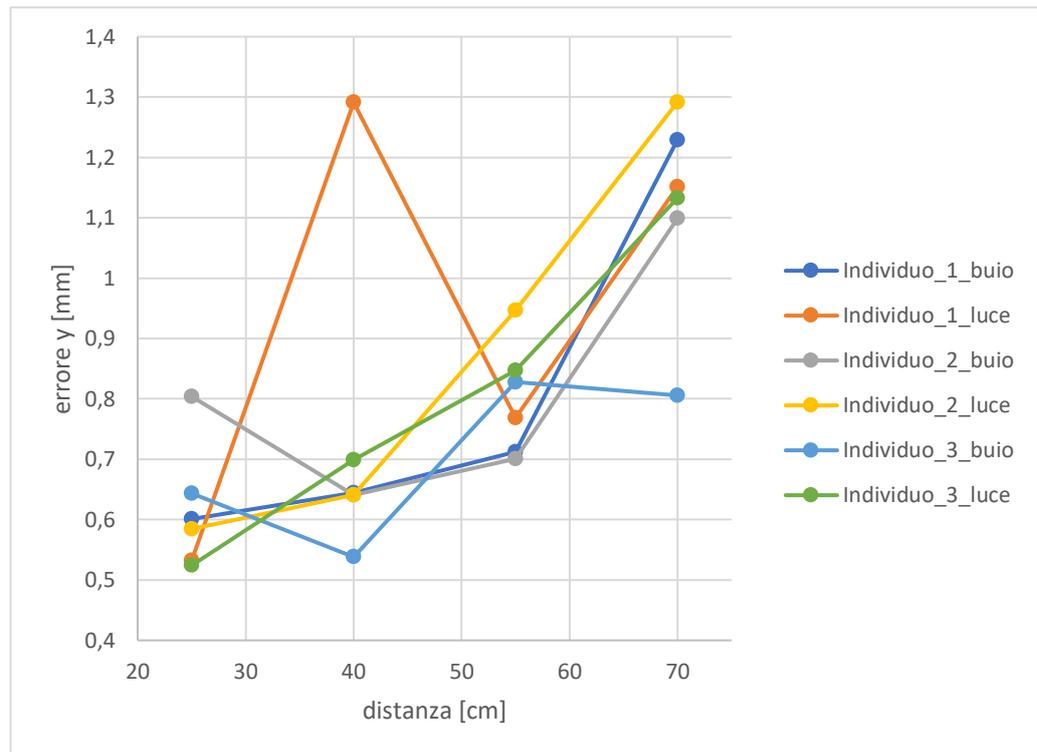


Figura 3.4 Grafico a dispersione: distanza vs errore y

L'andamento è analogo a quello delle x, con Individuo_1_luce e individuo_3_buio che si differenziano rispetto al comportamento generale. L'errore y è compreso tra 0.52 e 0.8 mm a 25 cm di distanza dal sensore. Invece a 40 cm è compreso tra 0.53 e 1.29 mm, in realtà escludendo l'Individuo_1_luce diventa tra 0.5 e 0.7 mm. Situazione diversa a distanza di 55 cm dove i valori medi sono concentrati tra 0.7 e 0.95 mm. A distanza di 75 cm i valori medi dell'MSE di y si impennano e si trovano tra 0.8 e 1.29 mm.

I valori medi nella direzione y presentano valori leggermente inferiori rispetto a quelli in direzione x, in tutte le distanze. Dopo aver analizzato qualitativamente il grafico a dispersione, si passa all'uso dei test di Fisher per avere anche un riscontro quantitativo. Secondo la logica precedente si va a verificare la significatività dei tre fattori (individuo, condizioni al contorno e distanza). Si inizia osservando la tabella 3.17 dove si mostrano i risultati dei test di Fisher tenendo fissa la distanza di 25 centimetri. In questa tabella si nota come solo l'individuo_2_buio è significativamente diverso.

	Individuo_1_buio_25	Individuo_1_luce_25	Individuo_2_buio_25	Individuo_2_luce_25	Individuo_3_buio_25	Individuo_3_luce_25
Individuo_1_buio_25	-					
Individuo_1_luce_25	compreso	-				
Individuo_2_buio_25	no	no	-			
Individuo_2_luce_25	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_buio_25	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_25	compreso	compreso	no	compreso	compreso	-

Tabella 3.16 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 25 cm

Invece a distanza di 40 centimetri, vedi tabella 3.17, l'unica condizione ad essere diversa è l'Individuo_1_luce. Per il resto non si notano differenze dovute al fattore individuo.

	Individuo_1_buio_40	Individuo_1_luce_40	Individuo_2_buio_40	Individuo_2_luce_40	Individuo_3_buio_40	Individuo_3_luce_40
Individuo_1_buio_40	-					
Individuo_1_luce_40	no	-				
Individuo_2_buio_40	compreso	no	-			
Individuo_2_luce_40	compreso	no	compreso	-		
Individuo_3_buio_40	compreso	no	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_40	compreso	no	compreso	compreso	compreso	-

Tabella 3.17 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 40 cm

In ordine crescente, proseguiamo ad analizzare la distanza di 55 centimetri, in tabella 3.18, dove l'unica voce fuori dal coro risulta per Individuo_2_luce.

	Individuo_1_buio_55	Individuo_1_luce_55	Individuo_2_buio_55	Individuo_2_luce_55	Individuo_3_buio_55	Individuo_3_luce_55
Individuo_1_buio_55	-					
Individuo_1_luce_55	compreso	-				
Individuo_2_buio_55	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_55	no	compreso	no	-		
Individuo_3_buio_55	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_55	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-

Tabella 3.18 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 55 cm

Infine, in tabella 3.19, si mostrano i risultati dei test ottenuti a distanza di 70 cm. Qui l'unica condizione a far eccezione è l'Individuo_3_buio.

	Individuo_1_buio_70	Individuo_1_luce_70	Individuo_2_buio_70	Individuo_2_luce_70	Individuo_3_buio_70	Individuo_3_luce_70
Individuo_1_buio_70	-					
Individuo_1_luce_70	compreso	-				
Individuo_2_buio_70	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_70	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_buio_70	no	compreso	compreso	no	-	
Individuo_3_luce_70	compreso	compreso	compreso	compreso	no	-

Tabella 3.19 Test ipotesi per MSE direzione y per la distanza 70 cm

Anche per questo indicatore, come prima detto per la direzione x, l'Individuo nella maggior parte dei casi non è significativo.

Si passa all'analisi del fattore luce e per farlo, si suddividono i risultati dei test di Fisher per individuo. In tabella 3.20 per l'Individuo_1 la luce risulta significativa solamente a 40 centimetri di distanza.

	Individuo_1_buio_25	Individuo_1_buio_40	Individuo_1_buio_55	Individuo_1_buio_70	Individuo_1_luce_25	Individuo_1_luce_40	Individuo_1_luce_55	Individuo_1_luce_70
Individuo_1_buio_25	-							
Individuo_1_buio_40	compreso	-						
Individuo_1_buio_55	compreso	compreso	-					
Individuo_1_buio_70	no	no	no	-				
Individuo_1_luce_25	compreso	compreso	compreso	no	-			
Individuo_1_luce_40	no	no	no	compreso	no	-		
Individuo_1_luce_55	compreso	compreso	compreso	no	no	no	-	
Individuo_1_luce_70	no	no	no	compreso	no	compreso	no	-

Tabella 3.20 Test ipotesi per MSE direzione y di Individuo_1 luce e buio

Per l'Individuo_2 la condizione al contorno risulta significativa a distanza di 55 centimetri dal sensore, si veda la tabella 3.21, invece per l'Individuo_3 l'eccezione di presenta a distanza di 70 centimetri, si veda tabella 3.22.

	Individuo o_2_ buio_25	Individuo o_2_ buio_40	Individuo o_2_ buio_55	Individuo o_2_ buio_70	Individuo o_2_ luce_25	Individuo o_2_ luce_40	Individuo o_2_ luce_55	Individuo o_2_ luce_70
Individuo_2_buio_40	compresc-							
Individuo_2_buio_55	compresc	compresc-						
Individuo_2_buio_70	no	no	no	-				
Individuo_2_luce_25	compresc	compresc	compresc	no	-			
Individuo_2_luce_40	compresc	compresc	compresc	no	compresc-			
Individuo_2_luce_55	compresc	no	no	compresc	no	no	-	
Individuo_2_luce_70	no	no	no	compresc	no	no	no	-

Tabella 3.21 Test ipotesi per MSE direzione y di Individuo_2 luce e buio

	Individuo o_3_ buio_25	Individuo o_3_ buio_40	Individuo o_3_ buio_55	Individuo o_3_ buio_70	Individuo o_3_ luce_25	Individuo o_3_ luce_40	Individuo_ 3_luce_55	Individuo_ 3_luce_70
Individuo_3_buio_25	-							
Individuo_3_buio_40	compresc-							
Individuo_3_buio_55	compresc	no	-					
Individuo_3_buio_70	compresc	no	compresc-					
Individuo_3_luce_25	compresc	compresc	no	no	-			
Individuo_3_luce_40	compresc	compresc	compresc	compresc	no	-		
Individuo_3_luce_55	no	no	compresc	compresc	no	compresc-		
Individuo_3_luce_70	no	no	no	no	no	no	no	-

Tabella 3.22 Test ipotesi per MSE direzione y di Individuo_3 luce e buio

Ci sono alcune eccezioni che coincidono anche con quelle presentate nella direzione x, come Individuo_2_buio a 40 cm e Individuo_3_buio a 70 cm.

La distanza diventa significativa dopo i 40 cm, vedi tabella 3.23, e arrivato a 70 cm l'errore aumenta di molto, proprio come l'MSE in direzione x. Quindi si può concludere dicendo che per questo indicatore i fattori luce e individuo non sono significativi, invece la distanza lo diventa superati i 40 cm.

	Individuo o_1_ buio_25	Individuo o_1_ buio_40	Individuo o_1_ luce_25	Individuo o_1_ luce_40	Individuo o_2_ buio_25	Individuo o_2_ buio_40	Individuo o_2_ luce_25	Individuo o_2_ luce_40	Individuo o_3_ buio_25	Individuo o_3_ buio_40	Individuo o_3_ luce_25	Individuo o_3_ luce_40
Individuo_1_buio_25	-											
Individuo_1_buio_40	compresc	-										
Individuo_1_luce_25	compresc	compresc	-									
Individuo_1_luce_40	no	no	no	-								
Individuo_2_buio_25	no	compresc	no	no	-							
Individuo_2_buio_40	compresc	compresc	compresc	no	compresc	-						
Individuo_2_luce_25	compresc	compresc	compresc	no	compresc	compresc	-					
Individuo_2_luce_40	compresc	compresc	compresc	no	compresc	compresc	compresc	-				
Individuo_3_buio_25	compresc	compresc	compresc	no	compresc	compresc	compresc	compresc	-			
Individuo_3_buio_40	compresc	compresc	compresc	no	no	compresc	compresc	compresc	compresc	-		
Individuo_3_luce_25	compresc	compresc	compresc	no	no	compresc	compresc	compresc	compresc	compresc	-	
Individuo_3_luce_40	compresc	compresc	no	no	compresc	compresc	compresc	compresc	compresc	compresc	no	-

Tabella 3.23 Test ipotesi per MSE y a distanza di 25 e 40 cm

3.2.3 MSE direzione z

L'ultimo componente dell'MSE è quello lungo l'asse z che descrive la profondità. Si inizia dal grafico a dispersione, dove si vede come l'andamento sia analogo ai casi precedenti, ma con valori superiori in tutte le distanze, come rappresentato in Figura 3.5.

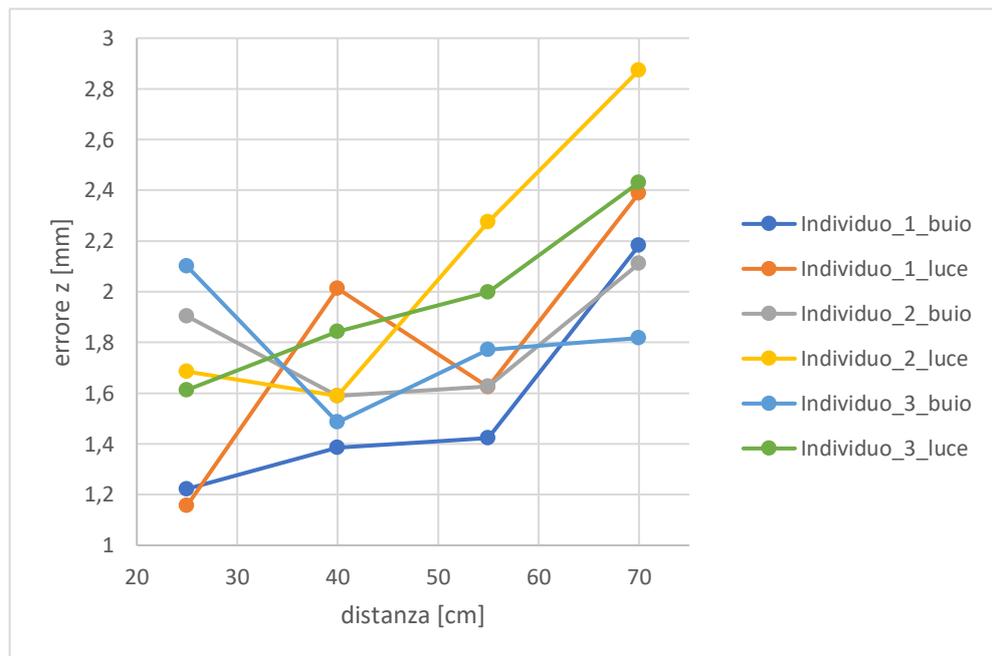


Figura 3.5 Grafico a dispersione: distanza vs errore z

I valori dell'MSE x sono meno crescenti da 25 cm a 55 cm rispetto ai casi precedenti. Infatti, per la distanza 25 cm l'errore delle varie condizioni è compreso tra 1.15 e 2.10 mm, a 40 cm è compreso tra 1.38 e 2.01 mm, invece a 55 cm va da 1.42 a 2.27 mm. Si nota uno stacco per la distanza di 70 cm, dove il range è tra 1.81 e 2.87 mm. L'ordine di grandezza, rispetto alle precedenti direzioni, non cambia. Si procede, dopo l'analisi qualitativa, con quella quantitativa con l'uso dei test di Fisher. Per prima cosa, si fissa la distanza per testare la significatività della condizione dell'individuo. Dai risultati della tabella 3.24 si nota come a distanza di 25 centimetri, i valori dell'MSE medi dell'Individuo_1 sono significativamente diversi rispetto agli altri.

	Individuo_1_ buio_25	Individuo_1_ luce_25	Individuo_2_ buio_25	Individuo_2_ luce_25	Individuo_3_ buio_25	Individuo_3_ luce_25
Individuo_1_buio_25	-					
Individuo_1_luce_25	compreso	-				
Individuo_2_buio_25	no	no	-			
Individuo_2_luce_25	no	no	compreso	-		
Individuo_3_buio_25	no	no	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_25	no	no	compreso	compreso	compreso	-

Tabella 3.24 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 25 cm

Discorso diverso per la distanza di 40 centimetri, tabella 3.25, dove l'unica condizione a fare eccezione è Individuo_1_buio confrontato con Individuo_1_luce e Individuo_3_luce.

	Individuo_1_ buio_40	Individuo_1_ luce_40	Individuo_2_ buio_40	Individuo_2_ luce_40	Individuo_3_ buio_40	Individuo_3_ luce_40
Individuo_1_buio_40	-					
Individuo_1_luce_40	no	-				
Individuo_2_buio_40	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_40	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_buio_40	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_40	no	compreso	compreso	compreso	compreso	-

Tabella 3.25 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 40 cm

Anche a distanza di 55 centimetri, tabella 3.26, ci sono alcune condizioni significativamente diverse, ma in linea generale l'individuo mantiene la sua non significatività.

	Individuo_1_ buio_55	Individuo_1_ luce_55	Individuo_2_ buio_55	Individuo_2_ luce_55	Individuo_3_ buio_55	Individuo_3_ luce_55
Individuo_1_buio_55	-					
Individuo_1_luce_55	compreso	-				
Individuo_2_buio_55	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_55	no	no	no	-		
Individuo_3_buio_55	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_55	no	compreso	compreso	compreso	compreso	-

Tabella 3.26 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 55 cm

Per ultimo, si analizza la distanza di 70 centimetri in tabella 3.27, dove i risultati mostrano coerenza con quelli precedenti.

	Individuo_1_ buio_70	Individuo_1_ luce_70	Individuo_2_ buio_70	Individuo_2_ luce_70	Individuo_3_ buio_70	Individuo_3_ luce_70
Individuo_1_buio_70	-					
Individuo_1_luce_70	compreso	-				
Individuo_2_buio_70	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_70	no	compreso	no	-		
Individuo_3_buio_70	compreso	compreso	compreso	no	-	
Individuo_3_luce_70	compreso	compreso	compreso	compreso	no	-

Tabella 3.27 Test ipotesi per MSE direzione z per la distanza 70 cm

I risultati dei test di Fisher mostrano come l'individuo, anche in questa direzione, nella maggior parte dei casi non è significativo.

Per quanto riguarda il fattore luce, si possono estrarre informazioni analizzando le tabelle suddivise per individuo.

Si procede con l'individuo_1, tabella 3.28, dove per il fattore luce, l'unica condizione, a parità di distanza, che è significativamente diversa è quella tra Individuo_1 luce e buio a 40 centimetri.

	Individuo_1_buio_25	Individuo_1_buio_40	Individuo_1_buio_55	Individuo_1_buio_70	Individuo_1_luce_25	Individuo_1_luce_40	Individuo_1_luce_55	Individuo_1_luce_70
Individuo_1_buio_25	-							
Individuo_1_buio_40	compreso	-						
Individuo_1_buio_55	compreso	compreso	-					
Individuo_1_buio_70	no	no	no	-				
Individuo_1_luce_25	compreso	compreso	compreso	no	-			
Individuo_1_luce_40	no	no	no	compreso	no	-		
Individuo_1_luce_55	no	compreso	compreso	compreso	no	compreso	-	
Individuo_1_luce_70	no	no	no	compreso	no	compreso	no	-

Tabella 3.28 Test ipotesi per MSE direzione z di Individuo_1 luce e buio

Come mostrato in tabella 3.29, per l'Individuo_2 sono due le condizioni con valori dell'MSE significativamente diversi: a distanza di 55 e 70 centimetri.

	Individuo_2_buio_25	Individuo_2_buio_40	Individuo_2_buio_55	Individuo_2_buio_70	Individuo_2_luce_25	Individuo_2_luce_40	Individuo_2_luce_55	Individuo_2_luce_70
Individuo_2_buio_25	-							
Individuo_2_buio_40	compreso	-						
Individuo_2_buio_55	compreso	compreso	-					
Individuo_2_buio_70	compreso	no	compreso	-				
Individuo_2_luce_25	compreso	compreso	compreso	compreso	-			
Individuo_2_luce_40	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_2_luce_55	compreso	no	no	compreso	no	no	-	
Individuo_2_luce_70	no	no	no	no	no	no	compreso	-

Tabella 3.29 Test ipotesi per MSE direzione z di Individuo_2 luce e buio

Ultimo individuo è il terzo, tabella 3.30, dove la luce risulta non significativa ad eccezione della distanza 70 centimetri. A differenza degli altri casi, qui si nota come le numerose celle azzurre indichino che la distanza per questo individuo non è significativa.

	Individuo_3_buio_25	Individuo_3_buio_40	Individuo_3_buio_55	Individuo_3_buio_70	Individuo_3_luce_25	Individuo_3_luce_40	Individuo_3_luce_55	Individuo_3_luce_70
Individuo_3_buio_25	-							
Individuo_3_buio_40	compreso	-						
Individuo_3_buio_55	compreso	compreso	-					
Individuo_3_buio_70	compreso	compreso	compreso	-				
Individuo_3_luce_25	compreso	compreso	compreso	compreso	-			
Individuo_3_luce_40	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-		
Individuo_3_luce_55	compreso	no	compreso	compreso	compreso	compreso	-	
Individuo_3_luce_70	compreso	no	no	no	no	no	compreso	-

Tabella 3.30 Test ipotesi per MSE direzione z di Individuo_3 luce e buio

Per ultimo fattore, si analizza la distanza, per comprendere quanto dovrebbe essere il limite massimo per un corretto utilizzo.

rispetto alle direzioni precedenti, qui la distanza risulta meno significativa fino a 55 cm, questo rafforza il fatto che l'acquisizione del sensore perde molta accuratezza dai 70 cm in poi. In tabella 3.31 vengono mostrati i risultati dei test di Fisher alle distanze di 25, 40 e 55 cm.

Si può concludere che per l'indicatore della media dell'MSE in direzione z, la distanza risulta significativa oltrepassando i 55 cm.

Con questo ultimo componente, si conclude l'analisi dell'indicatore MSE medio sottolineando come l'andamento dell'errore all'aumentare della distanza risulta lo stesso per tutte le direzioni, il fattore individuo e la condizione al contorno non sono significative e la distanza inizia ad essere significativa dopo i 40 cm nella direzione x e y, e dopo i 55 cm in direzione z.

	Individuo_1_ buio_25	Individuo_1_ buio_40	Individuo_1_ buio_55	Individuo_1_ luce_25	Individuo_1_ luce_40	Individuo_1_ luce_55	Individuo_2_ buio_25	Individuo_2_ buio_40	Individuo_2_ buio_55	Individuo_2_ luce_25	Individuo_2_ luce_40	Individuo_2_ luce_55	Individuo_3_ buio_25	Individuo_3_ buio_40	Individuo_3_ buio_55	Individuo_3_ luce_25	Individuo_3_ luce_40	Individuo_3_ luce_55
Individuo_1_ buio_25	-																	
Individuo_1_ buio_40	compreso	-																
Individuo_1_ buio_55	compreso	compreso	-															
Individuo_1_ buio_70	no	no	no															
Individuo_1_ luce_25	compreso	compreso	compreso	-														
Individuo_1_ luce_40	no	no	no	no	-													
Individuo_1_ luce_55	no	compreso	compreso	no	compreso	-												
Individuo_1_ luce_70	no	no	no	no	compreso	no												
Individuo_2_ buio_25	no	no	no	no	compreso	compreso	-											
Individuo_2_ buio_40	compreso	compreso	compreso	no	compreso	compreso	compreso	-										
Individuo_2_ buio_55	no	compreso	compreso	no	compreso	compreso	compreso	compreso	-									
Individuo_2_ buio_70	no	no	no	no	compreso	compreso	compreso	no	compreso									
Individuo_2_ luce_25	no	compreso	compreso	no	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-								
Individuo_2_ luce_40	compreso	compreso	compreso	no	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	compreso	-							
Individuo_2_ luce_55	no	no	no	no	compreso	no	compreso	no	no	no	no	-						
Individuo_2_ luce_70	no	compreso																
Individuo_3_ buio_25	no	no	no	no	compreso	compreso	compreso	no	compreso	compreso	no	compreso	-					
Individuo_3_ buio_40	compreso	no	compreso	-														
Individuo_3_ buio_55	no	compreso	compreso	no	compreso	-												
Individuo_3_ buio_70	no	no	compreso	no	compreso													
Individuo_3_ luce_25	no	compreso	compreso	no	compreso	-												
Individuo_3_ luce_40	no	no	compreso	no	compreso	-												
Individuo_3_ luce_55	no	no	no	no	compreso	no	compreso	compreso	compreso	-								
Individuo_3_ luce_70	no	no	no	no	compreso	no	compreso	no	no	no	no	compreso	compreso	no	no	no	no	compreso

Tabella 3.31 Test ipotesi per MSE direzione z distanza 25, 40, e 55 cm

3.3 Propagazione dell'incertezza landmark

Per il calcolo della propagazione dell'incertezza nel landmarking, non si analizzano tutte le 24 condizioni ma solo 6, come descritto nel capitolo precedente.

Applicando il metodo Monte Carlo, si hanno a disposizione 270 dati, per poter verificare se il fattore operatore sia significativo o meno. Per fare questo si ricorre al software Minitab e si esegue un'analisi della varianza (ANOVA).

L'ANOVA è stata svolta per 90 volte, cioè per ogni direzione del landmark e per ogni condizione. Dai risultati dell'ANOVA, si nota come nella maggior parte dei casi l'operatore risulta significativo. Infatti, l'operatore è risultato significativo ben 72 volte, invece per 18 volte non lo è stato. Sono stati raccolti nella tabella 3.32 le condizioni in cui l'operatore non è risultato significativo, in modo tale da poter estrapolare qualche informazione utile all'analisi.

condizione	distanza	landmark
Individuo_1_luce	25	Alare_sx,x
Individuo_1_luce	25	pronasale_z
Individuo_1_luce	25	subnasale_z
Individuo_2_luce	25	nasion,z
Individuo_2_luce	55	Alare_dx,z
Individuo_2_luce	55	nasion,z
Individuo_2_luce	55	pronasale_z
Individuo_2_luce	55	subnasale_y
Individuo_2_luce	55	subnasale_z
Individuo_3_luce	25	Alare_dx,z
Individuo_3_luce	25	nasion,z
Individuo_3_luce	25	pronasale_z
Individuo_3_luce	25	subnasale_x
Individuo_3_luce	25	subnasale_z
Individuo_3_luce	55	nasion,z
Individuo_3_luce	55	pronasale_y
Individuo_3_luce	55	pronasale_z
Individuo_3_luce	55	subnasale_z

Tabella 3.32 Sintesi delle condizioni in cui l'operatore è risultato non significativo

Si nota come la maggior parte delle volte in cui l'operatore non è significativo, è per il landmark in direzione z, cioè quello relativo alla profondità del pixel. Non si nota invece nessuna prevalenza riguardante la distanza, infatti metà delle volte che l'operatore non è risultato significativo si trova nella distanza 25 cm e l'altra metà a distanza 55 cm. Per quanto riguarda l'Individuo, non si riscontra nessuna informazione degna di nota, infatti nelle condizioni mostrate nella precedente tabella le condizioni dove l'operatore non è significativo, gli individui sembrano abbastanza distribuiti.

Per una maggiore comprensione dei dati, si mostrano due differenti condizioni in cui l'operatore risulta una volta significativo e una volta no.

La condizione scelta, in cui l'operatore risulta significativo, è il landmark alare destro in direzione x per l'Individuo_1_luce a distanza di 25 cm.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
fattore	2	0,000025	0,000012	19,17	0,000
Error	267	0,000173	0,000001		
Total	269	0,000198			

Model Summary				
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
	0,0008047	12,56%	11,90%	10,58%

Tabella 3.33 Analisi della varianza relativa a Individuo_1_luce_25cm del landmark Alare destro direzione x

Dall'output di Minitab si mostra anche l'andamento degli intervalli di fiducia, qui l'intervallo dell'Operatore_1 non si sovrappone con quello degli altri due. Invece l'Operatore_2 e l'Operatore_3 mostrano una lieve sovrapposizione degli intervalli. Si veda la figura sottostante. Tuttavia, nel complesso l'operatore in questa condizione risulta significativo.

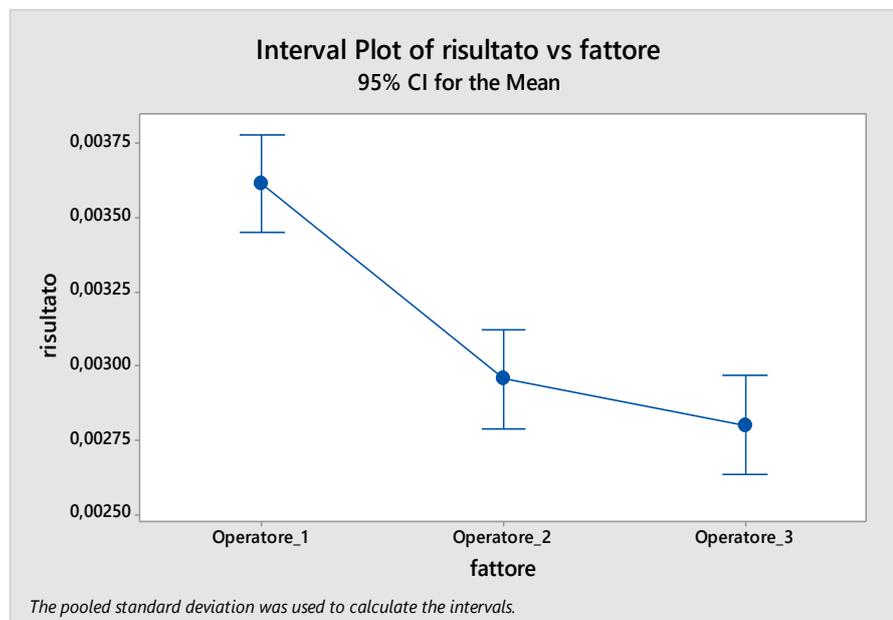


Figura 3.6 intervalli di fiducia relativa a individuo_1_luce_25cm del landmark Alare destro direzione x

Dopo aver visto l'output di una condizione significativa, si mostra quello di Individuo_1_luce_25cm alare sinistro direzione x, dove il fattore operatore non è significativo. In seguito, si riporta la tabella dell'ANOVA e gli intervalli di fiducia.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
fattore	2	0,000001	0,000000	0,06	0,940
Error	267	0,001249	0,000005		
Total	269	0,001250			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0021631	0,05%	0,00%	0,00%

Tabella 3.34 Analisi della varianza relativa a Individuo_1_luce_25cm del landmark Alare sinistro direzione x

Dagli intervalli di fiducia, si nota come questi coincidano per tutti e tre gli operatori, quindi il fattore operatore per questa condizione non è significativo. Una ulteriore analisi viene fatta con gli intervalli di fiducia, confrontando gli operatori a due a due per tutte e novanta le condizioni. Il risultato è riassunto nella tabella sottostante.

confronto	numero di codizioni con differenza non significativa
Operatore_1 e Operatore_2	31
Operatore_1 e Operatore_3	26
Operatore_2 e Operatore_3	40

Tabella 3.35 Riassunto del confronto tra intervalli di fiducia tra operatori

Considerando gli operatori a coppie, il risultato non cambia. Infatti, per tutti e tre le coppie nella maggior parte dei casi, l'operatore è significativo e non si riscontra nessuna prevalenza delle tre coppie, ma i risultati sono abbastanza distribuiti. Da questa prima parte di analisi sul landmarking, si evince che l'operatore è significativo durante il posizionamento manuale dei landmark, quindi questo processo diventa molto delicato, visto l'importanza di questi elementi per il calcolo delle distanze euclidee e

geodetiche, i quali potrebbero essere alterati dal posizionamento diverso fatto da diversi operatori.

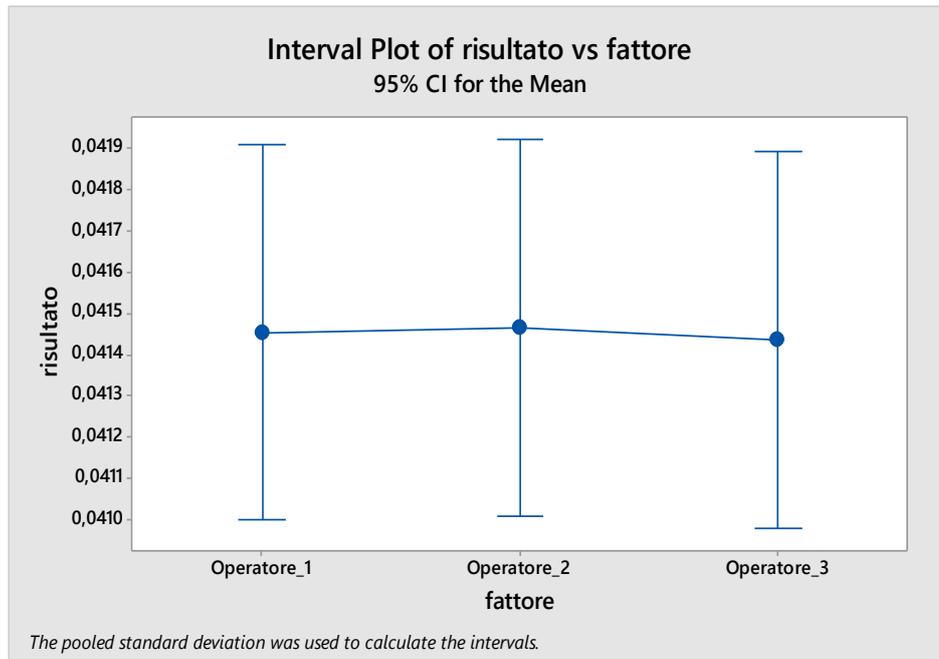


Figura 3.7 intervalli di fiducia relativa a Individuo_1_luce_25cm del landmark Alare sinistro direzione x

Ulteriori dati ricavabili dall'ANOVA sono l'incertezza estesa e i gradi di libertà. Eseguiti i calcoli descritti precedentemente, si ottengono la varianza totale e l'incertezza estesa, da confrontare con un errore atteso, nonché il massimo errore accettabile in questo campo.

L'errore atteso è un errore distribuito uniformemente con ampiezza del semi-campo pari a 4 mm, quindi ci si aspetta dei valori dell'incertezza estesa inferiori 4,62 mm. Per essere ritenuti adatti a questa applicazione.

In tabella 3.36 sono mostrate le condizioni in cui l'incertezza estesa è superiore al valore massimo ammissibile di 4,62 mm.

Si nota come le condizioni che mostrano errori superiori a quella di riferimento sono prevalentemente a distanza di 55 cm, quindi da ciò si può dedurre che la distanza è significativa per il calcolo dell'incertezza estesa. A confermare tale tesi, è il fatto che i valori più elevati (maggiori di 9 mm) sono tutti relativi alla distanza di 55 cm.

Per il resto, gli altri valori non sono così grandi, ma presentano 1-2 mm in più.

Da evidenziare è il fatto che nella maggior parte di questi casi, in cui l'incertezza estesa è superiore al valore ammissibile, si trova nel landmark alare destro e sinistro. Questo potrebbe essere un segnale di una cattiva definizione di tale landmark.

condizione	landmark	distanza	incertezza estesa [mm]
Individuo_1_luce_55_cm	Alare_sx,x	55	0,004659403
Individuo_1_luce_55_cm	Alare_sx,z	55	0,006198693
Individuo_2_luce_25_cm	Alare_sx,z	25	0,004765115
Individuo_2_luce_25_cm	subnasale_z	25	0,004972788
Individuo_2_luce_55_cm	Alare_dx,x	55	0,005021885
Individuo_2_luce_55_cm	Alare_dx,y	55	0,005621255
Individuo_2_luce_55_cm	Alare_dx,z	55	0,009298839
Individuo_2_luce_55_cm	Alare_sx,z	55	0,004883779
Individuo_3_luce_25_cm	Alare_dx,z	25	0,006805858
Individuo_3_luce_25_cm	subnasale_z	25	0,00472752
Individuo_3_luce_55_cm	Alare_sx,z	55	0,0091935
Individuo_3_luce_55_cm	nasion,z	55	0,005123022
Individuo_3_luce_55_cm	pronasale_z	55	0,005629186
Individuo_3_luce_55_cm	subnasale_z	55	0,009251545

Tabella 3.36 Condizioni di valori di incertezza estesa superiori a quelli di riferimento

4. Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata effettuata una caratterizzazione metrologica del sensore RealSense 300, per verificare se il suo utilizzo sia idoneo o meno per applicazione nel campo della chirurgia maxillo-facciale.

Il lavoro è stato suddiviso essenzialmente in tre fasi: acquisizione dei dati, elaborazione dei dati e calcolo degli indicatori.

Nella prima fase si sono acquisiti tutti i video nelle diverse condizioni dei tre fattori d'influenza presi in esame (individuo, luce, distanza) e successivamente dai video sono stati estratti i frame da elaborare. Nella seconda fase i dati sono stati trasformati in coordinate fisiche in modo da poter essere utilizzati per il calcolo degli indicatori. La terza fase si focalizza sul calcolo degli indicatori che ci danno informazioni sull'influenza dei tre fattori in gioco e mostrano i risultati della caratterizzazione metrologica del sensore SR300.

Si può concludere dicendo che per l'indicatore p (percentuale di punti non misurati), i fattori individuo e distanza sono significativi, invece per tale indicatore la luce non è un fattore significativo.

In altre parole, il numero di punti acquisiti non dipende dalla condizione al contorno di luce o buio, ma dall'individuo, cioè dalle caratteristiche del volto come la presenza di barba, forma del naso, della fronte, della bocca. L'altro fattore significativo per questo indicatore è la distanza, infatti all'aumentare della distanza aumentano i punti non misurati. Si nota come i valori dell'indicatore p medio nel peggiore dei casi non superi il 33%, che, considerando la presenza di molti punti non misurati ai confini del volto, è un buon risultato e indica che lo strumento è capace di acquisire una grande quantità di punti.

Per quanto riguarda la media dell'MSE, questa ha un andamento simile per tutte e tre le direzioni. Si nota come questo non dipenda dall'individuo, ma dalla distanza. Infatti, all'aumentare della distanza, aumenta anche l'MSE medio, il quale mostra valori critici a 70 cm di distanza dal sensore.

Inoltre, il fattore luce non mostra alcuna significatività.

I valori massimi dell'MSE tra i 25 cm e i 40 cm sono di 1.35 mm, 1.29 mm e 2.10 mm rispettivamente riferiti alle direzioni x, y e z. Quindi sono valori idonei per una applicazione nel campo della chirurgia-maxillo facciale.

In sintesi, dall'analisi di questi due indicatori, si evince che il sensore deve essere utilizzato per acquisire distanze a corto raggio, ma può essere utilizzato con qualsiasi condizione al contorno.

Sul posizionamento del landmark, i risultati ottenuti mostrano la significatività dell'operatore che li ha posizionati, dunque potrebbero esserci alcune lacune nelle regole di posizionamento. Questo potrebbe avere conseguenze sul calcolo delle distanze euclidee e geodetiche, importanti nel campo della chirurgia maxillo-facciale.

Invece, sulla propagazione dell'errore del posizionamento del landmarking, i risultati mostrano coerenza con quelli attesi. Infatti, nella maggior parte dei casi, i valori sono ammissibili, evidenziando pochi valori critici e mostrando come l'incertezza aumenti all'aumentare della distanza.

In conclusione, si può sostenere che una distanza di 70 cm diventa critica, ma in linea generale il sensore può essere utilizzato come strumento diagnostico 3D per applicazioni

chirurgiche, pur essendo uno strumento meno performante rispetto a scanner professionali 3D.

Un possibile sviluppo per questo studio potrebbe essere quello di rifare tali esperimenti, ma eliminando la condizione al contorno, visto che ne è stata constatata la non significatività. Inoltre, si potrebbe anche considerare un range di distanza tra 25 e 55 cm, escludendo i 70 cm, dato che il sensore risulta non idoneo per tali applicazioni.

Per quanto riguarda il landmarking, vista la significatività dell'operatore, un possibile sviluppo potrebbe essere quello di rifare le stesse analisi sviluppate in questa tesi, ma con un landmarking automatico, in modo da ottenere un landmarking non influenzato dall'operatore oppure con un landmarking manuale, ma con prescrizioni più dettagliate sui punti da posizionare.

APPENDICE A – SCRIPT MATLAB

A.1 Script per calcolo indicatore p

```
clc
close all
clear variable

directorynamen=uigetdir;
directorynamet=uigetdir;
directoryindicatoreNaN=uigetdir;
oldFolder = cd(directorynamen);
filt = '*mat';
nome = dir(fullfile(filt));

IndicatoreNan=zeros(1,240);
R=zeros(1,240);
C=zeros(1,240);

for p=1:240
    load(nome(p).name , 'I');
    nomebase=nome(p).name;
    taglio='Tagliato';
    nometagliato(p)= string(strcat(taglio,nomebase));
    [m,n]=size(I);
    for i=m:-1:1
        r(i)=any(I(i,:));
        if r(i)==0
            I(i,:)=[];
        end
    end

    for j=n:-1:1
        c(j)=any(I(:,j));
        if c(j)==0
            I(:,j)=[];
        end
    end

    [R(p),C(p)]=size(I);
    save(fullfile(directorynamet, nometagliato(p)), 'I');

    IndicatoreNan(p)=sum(isnan(I), 'all');
    strutturaindicatore(p).Nome=nome(p).name;
    strutturaindicatore(p).IndicatoreNaN=IndicatoreNan(p);
    strutturaindicatore(p).PuntiTotali=R(p)*C(p);

end

oldFolder = cd(directoryindicatoreNaN);
writetable(struct2table(strutturaindicatore), 'Individuo_2_Indicatore_NaN.xlsx');
```

A.2 Script per calcolo MSE

```
clc
close all
clear variable

directorynamen=uigetdir;
directorynamev=uigetdir;
directorynamews=uigetdir;
oldFolder = cd(directorynamen);
filt = '*mat';
nome = dir(fullfile(filt));

IndicatoreNan=zeros(1,30);
R=zeros(1,30);
C=zeros(1,30);

for p=1:30
    load(nome(p).name , 'I');
    nomebase=nome(p).name;
    taglio='Tagliato';
    nometagliato(p)= string(strcat(taglio,nomebase));
    [m,n]=size(I);
    for i=m:-1:1
        r(i)=any(I(i,:));
        if r(i)==0
            I(i,:)=[];
        end
    end

    for j=n:-1:1
        c(j)=any(I(:,j));
        if c(j)==0
            I(:,j)=[];
        end
    end

    [R(p),C(p)]=size(I);
    strutturatagl(p).name=nometagliato(p);
    strutturatagl(p).Matrice=I;
end

Rmax=max(R);
Cmax=max(C);
Ridimensionato=zeros(Rmax,Cmax,30);
matricexyz=zeros(Rmax*Cmax,3, 30);
```

```

for q=1:30
    I=strutturatagl(q).Matrice;
    [m,n]=size(I);
    rigagg=Rmax-m;
    rigasup=0;
    rigainf=0;
    for ra=1:rigagg
        if rigasup==rigainf
            rigasup=rigasup+1;
            I=[NaN(1,n);I];
        else
            I=[I;NaN(1,n)];
            rigainf=rigainf+1;
        end
    end
end

colagg=Cmax-n;
colsup=0;
colinf=0;

for ca=1:colagg
    if colsup==colinf
        colsup=colsup+1;
        I=[NaN(Rmax,1) I];
    else
        I=[I NaN(Rmax,1)];
        colinf=colinf+1;
    end
end

Ridimensionato(:,:,q)=I;
matricexyz(:,:,q)=main_deprojection(I);
ptCloud(q)=pointCloud(matricexyz(:,:,q));

end

fixed=ptCloud(15);
movingReg=ptCloud;

for q=1:30
    [tform(q),movingReg(q),rmse(q)]=pcregistericp(ptCloud(q),fixed);
end

mn=1;

for q=1:30
    for m=1:Rmax
        for n=1:Cmax
            MatriceXReg(m,n,q)=movingReg(1,q).Location(mn,1);
            MatriceYReg(m,n,q)=movingReg(1,q).Location(mn,2);
            MatriceZReg(m,n,q)=movingReg(1,q).Location(mn,3);
            mn=mn+1;
        end
    end
end
mn=1;
end

```

```

for q=1:30
    for m=1:Rmax
        for n=1:Cmax
            SEMatriceX(m,n,q)=(MatriceXReg(m,n,q)-MatriceXReg(m,n,15))^2;
            SEMatriceY(m,n,q)=(MatriceYReg(m,n,q)-MatriceYReg(m,n,15))^2;
            SEMatriceZ(m,n,q)=(MatriceZReg(m,n,q)-MatriceZReg(m,n,15))^2;
        end
    end
    mn=1;
end

MatriceVarXReg=var(MatriceXReg,0,3,'omitnan');
MediaVarXReg=mean(MatriceVarXReg,'all','omitnan');
MatriceNaNX=29-sum(isnan(SEMatriceX),3);
MeanSquaredErrorpixelX=sum(SEMatriceX,3,'omitnan')./MatriceNaNX;
MediaMSEpixelX=sum(MeanSquaredErrorpixelX,'all','omitnan')/nnz(MeanSquaredErrorpixelX);

MatriceVarYReg=var(MatriceYReg,0,3,'omitnan');
MediaVarYReg=mean(MatriceVarYReg,'all','omitnan');
MatriceNaNY=29-sum(isnan(SEMatriceY),3);
MeanSquaredErrorpixelY=sum(SEMatriceY,3,'omitnan')./MatriceNaNY;
MediaMSEpixelY=sum(MeanSquaredErrorpixelY,'all','omitnan')/nnz(MeanSquaredErrorpixelY);

MatriceVarZReg=var(MatriceZReg,0,3,'omitnan');
MediaVarZReg=mean(MatriceVarZReg,'all','omitnan');
MatriceNaNZ=29-sum(isnan(SEMatriceZ),3);
MeanSquaredErrorpixelZ=sum(SEMatriceZ,3,'omitnan')./MatriceNaNZ;
MediaMSEpixelZ=sum(MeanSquaredErrorpixelZ,'all','omitnan')/nnz(MeanSquaredErrorpixelZ);

save(fullfile(directorynamev,'Dati_varianza_Individuo_1_buio_70_cm'),'MediaMSEpixelX','MediaMSEpixelY','MediaMSEpixelZ');
save(fullfile(directorynamev,'WS_Calcolo_varianza_Individuo_1_buio_70_cm'));

```

APPENDICE B – TABELLE TEST IPOTESI

B.1 Test d'ipotesi sulle proporzioni p

p		Individuo_1								Individuo_2								Individuo_3								
		buio				luce				buio				luce				buio				luce				
		25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	
Individuo_1	buio	25	-																							
		40	1,37	-																						
		55	-0,67	-1,54	-																					
		70	-1,75	-2,34	-1,13	-																				
	luce	25	0,20	-1,08	0,78	1,81	-																			
		40	0,42	-0,53	0,86	1,80	0,27	-																		
		55	-0,36	-1,19	0,21	1,27	-0,47	-0,60	-																	
		70	-2,98	-3,53	-2,23	-0,94	-3,01	-2,89	-2,34	-																
Individuo_2	buio	25	-6,60	-7,18	-3,93	-1,59	-6,33	-5,03	-3,95	-0,35	-															
		40	-2,54	-3,44	-1,20	0,35	-2,55	-2,21	-1,38	1,53	3,24	-														
		55	-0,75	-1,52	-0,13	0,98	-0,84	-0,92	-0,32	2,03	3,40	0,95	-													
		70	-9,39	-9,80	-7,65	-5,32	-9,28	-8,43	-7,60	-4,28	-5,39	-7,36	-7,14	-												
	luce	25	-4,76	-5,46	-2,88	-0,93	-4,65	-3,89	-2,97	0,26	1,01	-2,01	-2,49	5,86	-											
		40	0,24	-0,49	0,66	1,56	0,13	-0,07	0,45	2,55	3,93	1,70	0,73	7,41	3,09	-										
		55	-3,02	-3,64	-2,12	-0,71	-3,05	-2,87	-2,24	0,30	0,82	-1,34	-1,89	4,98	0,10	-2,46	-									
		70	-6,90	-7,30	-5,97	-4,42	-6,89	-6,57	-6,01	-3,56	-4,02	-5,56	-5,69	0,06	-4,45	-6,02	-4,04	-								
Individuo_3	buio	25	-9,34	-9,74	-6,51	-3,73	-9,05	-7,54	-6,43	-2,53	-3,52	-6,23	-5,84	2,67	-4,19	-6,16	-3,24	2,01	-							
		40	-14,46	-14,23	-8,83	-4,96	-13,50	-10,11	-8,55	-3,64	-6,07	-9,23	-7,75	1,90	-6,57	-7,85	-4,62	1,36	-1,43	-						
		55	-11,37	-11,65	-8,09	-4,95	-10,99	-9,14	-7,93	-3,73	-5,41	-8,04	-7,30	1,34	-5,96	-7,50	-4,58	0,98	-1,72	-0,60	-					
		70	-12,94	-13,18	-9,85	-6,58	-12,60	-10,83	-9,66	-5,40	-7,60	-9,93	-9,03	-0,71	-8,01	-9,13	-6,37	-0,63	-4,08	-3,39	-2,49	-				
	luce	25	-9,79	-10,12	-6,41	-3,48	-9,37	-7,52	-6,31	-2,24	-3,22	-6,17	-5,68	3,20	-3,94	-6,01	-2,95	2,38	0,57	2,27	2,41	4,83	-			
		40	-9,41	-9,82	-6,85	-4,14	-9,17	-7,83	-6,77	-2,98	-4,07	-6,58	-6,21	2,02	-4,67	-6,51	-3,70	1,53	-0,72	0,49	0,91	3,22	1,29	-		
		55	-8,14	-8,60	-6,21	-3,87	-8,00	-7,08	-6,18	-2,77	-3,54	-5,82	-5,70	1,96	-4,14	-6,04	-3,41	1,52	-0,58	0,52	0,90	3,04	1,08	0,07	-	
		70	-12,21	-12,53	-10,25	-7,63	-12,05	-11,02	-10,14	-6,60	-8,31	-10,15	-9,65	-2,59	-8,69	-9,80	-7,45	-2,22	-5,58	-5,08	-4,31	-2,20	6,18	-4,87	-4,66	-

B.2 Test d'ipotesi sull'MSE direzione z

MSE, z		Individuo_1								Individuo_2								Individuo_3								
		buio				luce				buio				luce				buio				luce				
		25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	25	40	55	70	
Individuo_1	buio	25	-																							
		40	0,78	-																						
		55	0,74	0,95	-																					
		70	0,31	0,40	0,42	-																				
	luce	25	1,12	1,43	1,51	3,56	-																			
		40	0,37	0,47	0,50	1,18	0,33	-																		
		55	0,57	0,73	0,77	1,81	0,51	1,53	-																	
	70	0,26	0,34	0,35	0,83	0,23	0,71	0,46	-																	
Individuo_2	buio	25	0,41	0,53	0,56	1,31	0,37	1,12	0,73	1,57	-															
		40	0,59	0,76	0,80	1,89	0,53	1,60	1,05	2,26	1,44	-														
		55	0,56	0,72	0,77	1,80	0,51	1,53	1,00	2,16	1,37	0,95	-													
		70	0,34	0,43	0,45	1,07	0,30	0,91	0,59	1,28	0,81	0,57	0,59	-												
	luce	25	0,53	0,67	0,71	1,68	0,47	1,42	0,93	2,01	1,28	0,89	0,93	1,57	-											
		40	0,59	0,76	0,80	1,89	0,53	1,60	1,05	2,26	1,44	1,00	1,05	1,76	1,13	-										
		55	0,29	0,37	0,39	0,92	0,26	0,78	0,51	1,10	0,70	0,49	0,51	0,86	0,55	0,49	-									
	70	0,18	0,23	0,25	0,58	0,16	0,49	0,32	0,69	0,44	0,31	0,32	0,54	0,34	0,31	0,63	-									
Individuo_3	buio	25	0,34	0,43	0,46	1,08	0,30	0,92	0,60	1,29	0,82	0,57	0,60	1,01	0,64	0,57	1,17	1,87	-							
		40	0,68	0,87	0,92	2,16	0,61	1,84	1,20	2,59	1,64	1,15	1,20	2,02	1,29	1,15	2,35	3,74	2,00	-						
		55	0,48	0,61	0,64	1,52	0,43	1,29	0,84	1,82	1,16	0,80	0,84	1,42	0,91	0,80	1,65	2,63	1,41	0,70	-					
		70	0,45	0,58	0,61	1,44	0,40	1,23	0,80	1,73	1,10	0,76	0,80	1,35	0,86	0,76	1,57	2,50	1,33	0,67	0,95	-				
	luce	25	0,57	0,74	0,78	1,83	0,51	1,56	1,01	2,19	1,39	0,97	1,02	1,71	1,09	0,97	1,99	3,17	1,70	0,85	1,21	1,27	-			
		40	0,44	0,56	0,60	1,40	0,39	1,19	0,78	1,68	1,07	0,74	0,78	1,31	0,84	0,74	1,52	2,43	1,30	0,65	0,92	0,97	0,77	-		
		55	0,37	0,48	0,51	1,19	0,34	1,02	0,66	1,43	0,91	0,63	0,66	1,12	0,71	0,63	1,30	2,07	1,11	0,55	0,79	0,83	0,65	0,85	-	
	70	0,25	0,32	0,34	0,81	0,23	0,69	0,45	0,97	0,61	0,43	0,45	0,75	0,48	0,43	0,88	1,40	0,75	0,37	0,53	0,56	0,44	0,58	0,68	-	

Bibliografia e Sitografia

- [1] E. Vezzetti e F. Marcolin, «Geometrical descriptors for human face morphological analysis and recognition,» *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 928-939, 2012.
- [2] E. Vezzetti, F. Marcolin e G. Fracastoro, «3D face recognition: An automatic strategy based on geometrical,» *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 1768-1776, 2014.
- [3] I. Corporation, «Intel® RealSense™ Camera SR300,» [Online]. Available: https://www.mouser.com/pdfdocs/intel_realsense_camera_sr300.pdf. [Consultato il giorno 2020].
- [4] M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi, M. U. F. Servi e V. Yari, «On the Performance of the Intel SR300 Depth Camera: Metrological and Critical Characterization,» *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 17, pp. 4508-4519, 2017.
- [5] Joint Committee for Guides in Metrology, «International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM),» 2012.
- [6] Joint Committee for Guides in Metrology, «Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement,» 2008.
- [7] A. Griguolo, «Chirurgia Maxillo-Facciale,» [Online]. Available: <https://www.my-personaltrainer.it/salute/chirurgia-maxillo-facciale.html>. [Consultato il giorno 2020].
- [8] G. Vicario e R. Levi, *Metodi Statistici per la sperimentazione*, Torino: Società Editrice Esculapio, 2008.