



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA BIOMEDICA

COMPARAZIONE DI DUE VISORI DI REALTÀ MISTA PER LA
CHIRURGIA MAXILLOFACCIALE: VALUTAZIONE DEGLI ERRORI
GEOMETRICI

COMPARISON OF TWO MIXED REALITY HEADSETS FOR
MAXILLOFACIAL SURGERY: EVALUATION OF GEOMETRIC ERRORS

RELATORE:

PROF. MANDOLINI MARCO

TESI DI LAUREA DI:

PIROZZI LETIZIA

CORRELATRICE:

DOTT.SSA BRUNZINI AGNESE

I. Sommario

I. Sommario	II
II. Elenco delle figure	IV
III. Elenco delle tabelle	V
1. Introduzione	1
2. Stato dell'arte	4
2.1 Chirurgia maxillofacciale.....	4
2.1.1 Osteotomie e riposizionamento.....	7
2.1.2 Piano chirurgico	9
2.2 Realtà Mista	12
2.2.1 Tecnologie di supporto: Visori per la realtà mista	15
2.2.1.1 Microsoft HoloLens 2	16
2.2.1.2 Varjo XR-3	17
2.3 Impiego della Realtà Mista nella medicina.....	18
3. Metodo.....	22
3.1 I prototipi fisici.....	22
3.2 Il test.....	23
3.3 Software di elaborazione dati.....	27
3.3.1 MeshLab.....	27
3.3.2 Rhinoceros	28
3.3.3 CloudCompare	28
3.4 Approccio di elaborazione dati	28
3.4.1 Verifica della qualità della scansione: Allineamento	29
3.4.2 Verifica della congruenza delle curve di taglio reali sulla superficie della mesh nominale 33	
3.4.3 Analisi delle simmetrie delle curve.....	35
3.4.3.1 Verifica della congruenza tra le curve scansionate specchiate e le curve nominali	36
3.4.3.2 Verifica della qualità dell'ologramma visionato	38
3.4.4 Margine di miglioramento teorico nella genioplastica	41
3.4.5 Verifica della lunghezza dell'interasse tra i fori mascellari	42

3.4.6	Applicazione di una rototraslazione rigida per l'allineamento delle curve reali alle curve nominali.....	44
3.5	Parametri calcolati.....	44
4.	Risultati e discussione	46
5.	Conclusione.....	50
6.	Appendice	51
7.	Bibliografia	56

II. Elenco delle figure

Figura 1 Osteotomia di Le Fort I	8
Figura 2 BSSO linee di taglio	8
Figura 3 Linee di taglio per la genioplastica	9
Figura 4 VSP	10
Figura 5 Guide chirurgiche per le osteotomie mascellari e mandibolari	11
Figura 6 Splint dentale	11
Figura 7 Rappresentazione della Reality–Virtuality continuum [13]	13
Figura 8 Microsoft HoloLens 2	17
Figura 9 Varjo XR-3	18
Figura 10 Riabilitazione con ausilio di un'applicazione MR	20
Figura 11 Visualizzazione del corpo umano per scopi didattici con un'applicazione MR	20
Figura 12 Pianificazione preoperatoria con un'applicazione MR	21
Figura 13 Visualizzazione organi mediante MR	21
Figura 14 Selezione Modalità con HoloLens 2	24
Figura 15 Selezione Modalità con Varjo XR-3	24
Figura 16 Esecuzione curve di taglio per l'osteotomia della mascella con HoloLens 2	25
Figura 17 Esecuzione curve di taglio per osteotomia della mandibola con Varjo XR-3	25
Figura 18 Esecuzione dei fori ossei sulla mascella con HoloLens 2	25
Figura 19 Prototipo mandibola scannerizzato	26
Figura 20 Prototipo mascella scannerizzato	27
Figura 21 Workflow complessivo del lavoro	28
Figura 22 Verifica qualità Scansione, mandibola (HoloLens) 1	32
Figura 23 Verifica qualità della scansione, mandibola (Varjo XR-3) 2	32
Figura 24 Esempio file .PLY	33
Figura 25 Curva di taglio sulla mandibola (Ortognatica)	35
Figura 26 Curva di taglio sulla mandibola (Ortognatica) 2	35
Figura 27 Visualizzazione curva specchiata angolo mandibolare (in giallo)	37
Figura 28 Sovrapposizione ed analisi curve, angolo mandibolare	38
Figura 29 Analisi curva reale, angolo mandibolare	38
Figura 30 Processo di esportazione delle curve di taglio dell'angolo mandibolare: A) Specchiatura curva; B) Selezione curve da esportare	39
Figura 31 Analisi simmetria su MeshLab, angolo mandibolare	40
Figura 32 Analisi simmetria su CloudCompare, angolo mandibolare	41
Figura 33 Mandibola-Genioplastica, qualità ologramma, approccio best-fit	42
Figura 34 Fori mascellari: A) Visualizzazione fori scansionati (verde) e fori nominali (bianco); B) Visualizzazione interasse fori scansionati (verde)	43

III. Elenco delle tabelle

Tabella 1 Mascella, Errori medi HoloLens e Varjo	46
Tabella 2 Mandibola, Errori medi HoloLens e Varjo	47
Tabella 3 Mascella e Mandibola, Errori di partenza HoloLens e Varjo	48
Tabella 4 Mandibola e Mascella, Qualità ologramma curve e fori, HoloLens e Varjo	48
Tabella 5 Mandibola, Analisi curva Ortognatica e Genioplastica, Hololens	51
Tabella 6 Mandibola, Analisi curve angolo mandibolare, HoloLens	52
Tabella 7 Mandibola e mascella, qualità dell'ologramma delle curve, HoloLens.....	52
Tabella 8 Mascella, errori medi delle curve e fori, HoloLens	53
Tabella 9 Mandibola, errori medi per le curve di genioplastica e ortognatica, Varjo XR-3	54
Tabella 10 Mandibola, errori medi angolo mandibolare, Varjo XR-3	54
Tabella 11 Mascella, errori medi curve e fori, Varjo XR-3	55
Tabella 12 Mandibola e mascella, qualità ologramma delle curve e dei fori.....	55

1. Introduzione

La chirurgia maxillofacciale è una branca della chirurgia che si occupa della correzione e del trattamento chirurgico di anomalie, traumi e disfunzioni che coinvolgono le ossa mascellari, ossa mandibolari, denti e strutture facciali.

Un esempio di questa specialità è la chirurgia ortognatica che si concentra sulla correzione delle malformazioni maxillo-mandibolari con l'obiettivo di ripristinare una corretta anatomia e fisiologia del sistema masticatorio e facciale, trattando anche problemi delle vie aeree, la disfunzione dell'articolazione temporomandibolare e le malocclusioni risultanti da asimmetrie e disarmonie della mascella.

Le principali procedure eseguite in questo tipo di chirurgia sono l'osteotomia e il riposizionamento.

L'osteotomia consiste nella recisione delle strutture ossee mentre il riposizionamento è la procedura che segue l'osteotomia che consente il riallineamento e la riorientazione dei frammenti ossei osteotomizzati per correggere il difetto anatomico.

La procedura chirurgica è preceduta dalla valutazione e dalla diagnosi clinica del paziente attraverso esami, radiografie, e modelli tridimensionali della morfologia maxillo-mandibolare nonché dall'elaborazione di un piano preoperatorio.

Gli approcci convenzionali per le osteotomie si basano sull'uso di guide chirurgiche personalizzate stampate in 3D, mentre le operazioni di riposizionamento sono assistite da splint dentali in resina, entrambi ottenuti tramite modellazioni CAD. Tuttavia, la progettazione e la realizzazione di questi ausili costituiscono un notevole dispendio di tempo e di costi, e inoltre potrebbero non adattarsi facilmente alle modifiche del piano preoperatorio.

Al fine di affrontare tali problematiche stanno emergendo tecnologie innovative, come la realtà mista, che permette di combinare ambienti reali e virtuali in un'unica soluzione.

Nel contesto chirurgico, la realtà mista può rappresentare uno strumento valido per guidare le procedure tramite immagini virtuali, come guide chirurgiche virtuali o ausili grafici per il paziente.

Le immagini virtuali devono essere correttamente posizionate sugli elementi del mondo reale, il che richiede metodi di registrazione robusti, come l'utilizzo di markers o algoritmi in grado di riconoscere determinate caratteristiche degli elementi dell'ambiente reale.

La visualizzazione simultanea dell'ambiente reale e virtuale dipende dai dispositivi di output; la maggior parte di tali dispositivi sono visori indossabili, questi possono essere di due tipologie: visione ottica diretta e visione tramite video.

La differenza tra le due tipologie risiede nel modo in cui l'ambiente reale viene percepito: i dispositivi a visione ottica diretta sono dotati di lenti che permettono una visione immediata dell'ambiente circostante, mentre i dispositivi a visione tramite video impiegano delle videocamere per acquisire il contenuto reale che viene poi visualizzato su schermi posizionati di fronte agli occhi.

Poiché gli interventi di chirurgia maxillofacciale sono procedure lunghe e complesse, l'integrazione dei dispositivi di realtà mista nelle sale operatorie è ancora nelle fasi iniziali, sebbene sia già stato sperimentato in alcuni ambiti specifici. [1][2]

Il presente lavoro si concentra sulla valutazione dell'accuratezza con cui gli ologrammi, visualizzati tramite visori Microsoft HoloLens 2 e Varjo-XR3, rappresentano le curve di taglio simulate per osteotomie. L'obiettivo è determinare quanto fedelmente le linee di taglio virtuali corrispondano a quelle reali e le eventuali cause di discrepanza tra la geometria virtuale e nominale.

L'approccio di analisi consiste in una comparazione tra geometrie con la misura del loro scostamento al fine di valutare l'errore associato all'uso di questa tecnologia.

L'errore viene analizzato sia nel peggiore dei casi sia nelle condizioni ottimali, cercando di determinare il margine di precisione minimo possibile.

Per il confrontare le geometrie virtuali e nominali sono stati utilizzati i software MeshLab, CloudCompare e Rhinoceros, che hanno permesso di eseguire le operazioni di verifica dell'allineamento, misurazione degli scostamenti, visualizzazione delle differenze tra i modelli e manipolazione delle curve per ottenere una comparazione accurata e dettagliata.

I risultati ottenuti a livello quantitativo sono stati rappresentati mediante la media e la deviazione standard; infine, i dati sono stati raccolti in un file Excel per permettere una visione immediata.

Il materiale oggetto di analisi è stato ottenuto da un test sperimentale durante il quale sono state eseguite simulazioni di osteotomie della mandibola e della mascella su modelli fisici tridimensionali, dotati di appositi markers, in un ambiente di realtà mista.

2. Stato dell'arte

Questo capitolo verte sugli argomenti necessari per comprendere il contesto in cui si inserisce questa tesi.

Viene presentata la chirurgia maxillofacciale e le procedure che tradizionalmente vengono eseguite in questo ambito. Inoltre, viene fornita la definizione di realtà mista esaminando i concetti fondamentali per comprenderne il significato e l'applicazione nell'ambito medico, con un focus particolare sulla chirurgia maxillofacciale.

2.1 Chirurgia maxillofacciale

La chirurgia maxillofacciale è una specialità chirurgica che si occupa del trattamento di patologie, deformità e traumi che coinvolgono la testa, il collo, il viso, la bocca, le ossa facciali e le strutture correlate.

Può essere considerata un ponte tra la medicina e l'odontoiatria, in quanto affronta condizioni che richiedono competenze di ambo i settori. Tra le patologie trattate figurano le patologie delle ghiandole salivari, le disarmonie facciali, il dolore facciale, i disturbi dell'articolazione temporo-mandibolare (ATM), le problematiche dentarie, le cisti e i tumori delle ossa facciali, nonché numerose affezioni che riguardano la mucosa orale, come ulcere della bocca e infezioni.

Questa branca della chirurgia è fondamentale sia per il trattamento di condizioni che richiedono l'abilità chirurgica che la comprensione delle funzioni estetiche e funzionali del viso e della bocca.

[3]

In associazione a queste patologie ci sono diverse tecniche chirurgiche: la chirurgia ortognatica, la chirurgia dell'articolazione temporo-mandibolare (ATM), l'implantologia dentale, la chirurgia per palatoschisi/labioschisi, la chirurgia dei traumi facciali. [1]

A seguire si introducono le principali procedure.

La chirurgia ortognatica ha l'obiettivo di correggere malformazioni dento-scheletriche e maxillo-mandibolari [5], e rappresenta il trattamento principale per i pazienti che hanno delle condizioni dento-facciali troppo gravi da poter essere corrette attraverso interventi chirurgici o ortodontici di camouflage. [4]

Le motivazioni per cui un paziente si sottopone alla procedura possono essere sia di natura estetica che funzionale.

Ad esempio, un'alterazione del linguaggio dovuta ad un rapporto scorretto tra elementi dentari, lingua e labbra non permette di articolare correttamente le parole, così come una disfunzione nell'incidere o masticare del cibo. [5]

Durante l'intervento, il chirurgo pratica delle incisioni all'interno della bocca per accedere alle ossa della mascella e del viso, per riposizionarle e stabilizzarle mediante piastre e viti chirurgiche. [1]

La chirurgia dell'articolazione temporo-mandibolare (ATM) è finalizzata al trattamento delle problematiche patologiche che coinvolgono questa articolazione, la quale connette la mandibola al cranio. [6]

I disturbi che coinvolgono l'ATM possono portare il paziente ad avere un'apertura orale limitata, difficoltà nella masticazione a causa del dolore e del blocco articolare. I pazienti affetti da tali disturbi riferiscono crampi dei muscoli masticatori o dolorosi clic articolari.

La procedura chirurgica viene utilizzata per ripristinare e riparare il tessuto danneggiato o rimuovere eventuali porzioni di tessuti che non sono recuperabili, o per favorire la guarigione mediante l'uso di innesti per sostituire i tessuti compromessi. [7]

Un impianto dentale rappresenta una delle soluzioni per la sostituzione di denti mancanti.

L'impianto, realizzato artificialmente, viene inserito nei tessuti orali al di sotto la mucosa o nell'osso mascellare dove si fissa grazie al processo di osteointegrazione, al fine di fornire supporto ad una protesi dentaria fissa o removibile. [8][10]

Questa procedura permette ai pazienti di recuperare la funzione masticatoria, l'estetica, la fonazione, il sorriso e la deglutizione. Nei pazienti con dolore orofacciale può alleviare sintomi dolorosi. [9]

La chirurgia per palatoschisi/labioschisi è una procedura che è volta a riparare un difetto congenito in cui le strutture labiali e palatali non si uniscono correttamente durante le fasi iniziali dello sviluppo fetale.

Questa malformazione comporta problematiche funzionali ed estetiche, come difficoltà nell'alimentazione, disturbi del linguaggio e asimmetrie facciali.

La correzione chirurgica viene generalmente eseguita tra i 6 e 12 mesi di età con l'obiettivo di ripristinare la continuità anatomica delle strutture coinvolte.

L'intervento prevede la chiusura della fessura labio-palatina, utilizzando tecniche avanzate di chirurgia, che possono includere l'impiego di lembi di tessuti locali o il trapianto di tessuti provenienti da altre aree del corpo, al fine di ottenere una riparazione funzionale ed esteticamente accettabile. [1]

La chirurgia dei traumi facciali viene impiegata quando si verifica un danno alle strutture ossee o ai tessuti molli del viso, causato da incidenti stradali, aggressioni, infortuni sportivi, cadute, esposizioni chimiche o termiche.

Poiché il volto umano è un'area anatomica complessa, caratterizzata dalla presenza di numerose ossa, vasi sanguigni, nervi, muscoli e organi sensoriali, se non adeguatamente trattato può comportare la perdita permanente di funzioni come la vista, la masticazione, la parola e la deglutizione.

Le procedure chirurgiche adottate per l'intervento possono essere di varia natura a seconda della gravità del trauma. [11]

2.1.1 Osteotomie e riposizionamento

Le principali procedure della chirurgia ortognatica sono le osteotomie e il riposizionamento. L'osteotomia consiste nella recisione delle strutture ossee mentre il riposizionamento è la procedura che segue l'osteotomia che consente il riallineamento e la riorientazione dei frammenti ossei osteotomizzati per correggere il difetto anatomico.

Queste procedure devono essere eseguite in modo sicuro e, preferibilmente, in modo intraorale per evitare cicatrici sul viso, garantendo al contempo un'adeguata esposizione della struttura ossea coinvolta.

La procedura di osteotomia che riguarda la mascella viene generalmente eseguita per correggere le anomalie della mascella superiore o delle malocclusioni, quindi difetti del morso.

In tale contesto, la procedura adottata più frequentemente è l'osteotomia di Le Fort I.

I tagli vengono praticati attraverso la mucosa gengivale sopra i denti superiori per accedere all'osso mascellare, dopodiché la mascella superiore viene fratturata in modo controllato mediante strumenti chirurgici adeguati. Le linee di taglio seguite in questo intervento sono rappresentate nella Figura 1.

[12][2]

Tra le osteotomie che riguardano la mandibola, sono di rilevanza gli interventi di avanzamento mandibolare (BSSO) e l'osteotomia dell'angolo mandibolare (MASO)

La prima viene eseguita mediante un'osteotomia sagittale bilaterale (BSSO) e viene adottata principalmente per la correzione del retrognatismo e il prognatismo mandibolare. La Figura 2, mostra le linee di taglio utilizzate per la procedura.

La seconda viene usata per correggere le asimmetrie della mandibola, come angoli mandibolari prominenti.

La genioplastica è una chirurgia del mento che corregge disarmonie, come un mento troppo piccolo o prominente. Si può eseguire un'osteotomia per spostare il mento, o un innesto osseo o impianto per aumentarne la proiezione. L'intervento si svolge attraverso un'incisione nella bocca per esporre i muscoli mentonieri e l'osso. (Figura 3). [12]

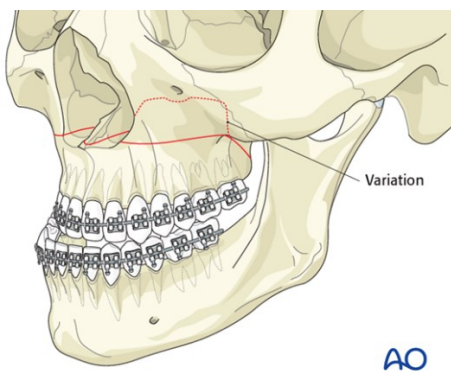


Figura 1 Osteotomia di Le Fort I

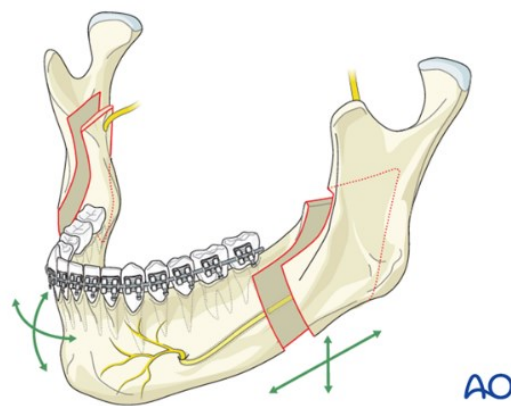


Figura 2 BSSO linee di taglio

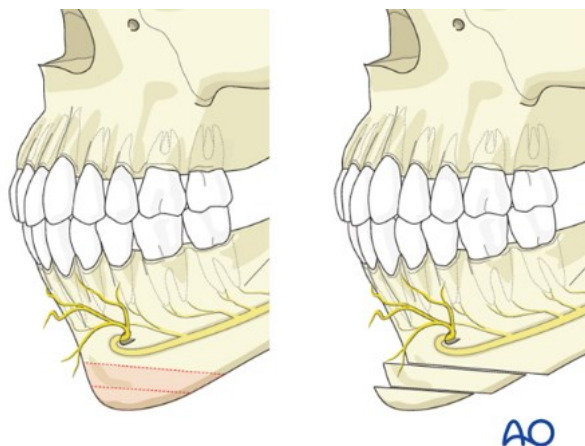


Figura 3 Linee di taglio per la genioplastica

Segue le procedure sopracitate, la fase di riposizionamento che consiste nella traslazione e rotazione delle porzioni ossee di interesse.

2.1.2 Piano chirurgico

Prima di eseguire qualsiasi tipo di intervento maxillofacciale, i chirurghi devono pianificare con dettaglio la procedura chirurgica. Tradizionalmente, questa pianificazione veniva effettuata mediante tecnologie 2D, che però presentavano alcune limitazioni, in quanto non erano in grado di fornire informazioni complete sulle strutture anatomiche tridimensionali del volto. Di conseguenza, risultava difficile prevedere con accuratezza la posizione post-operatoria delle ossa dopo le osteotomie.

Grazie allo sviluppo delle nuove tecnologie, sono stati introdotti metodi tridimensionali che permettono di acquisire in 3D sia le strutture superficiali che le fondamenta scheletriche. Tra questi metodi rientrano la scansione dell'arcata intraorale, la tomografia computerizzata (CT), la tomografia computerizzata cone beam (CBCT), la risonanza magnetica (MRI) e la fluoroscopia. Le immagini mediche ottenute vengono poi tradotte in formato DICOM (standard internazionale per le immagini

mediche) per ottenere dati volumetrici. Questi dati possono essere utilizzati per progettare impianti personalizzati, come splint dentali o guide chirurgiche, e per la pianificazione virtuale 3D dell'intervento.

La Pianificazione Chirurgica Virtuale 3D (VSP) consente la simulazione di un intervento. Nel contesto di chirurgia maxillofacciale è particolarmente rilevante poiché permette di creare un'occlusione virtuale, definire le linee di taglio per le osteotomie e il riposizionamento virtuale di mascella e mandibola nella posizione ideale, basato sulla simulazione in tempo reale dei tessuti molli del volto. (Figura 4)

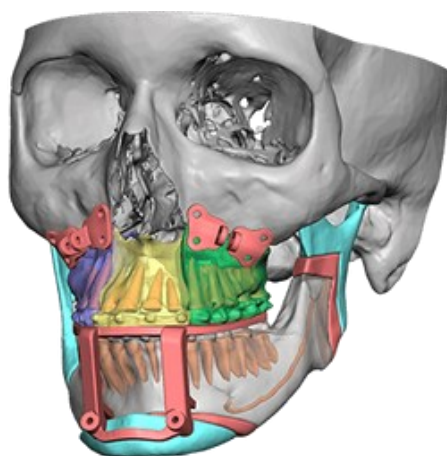


Figura 4 VSP

Le guide chirurgiche per le osteotomie sono le linee che i chirurghi devono seguire per eseguire correttamente le resezioni ossee. Queste linee sono progettate su software dedicati per poi essere stampate in 3D e utilizzate durante l'intervento. Gli splint dentali, invece, sono dispositivi generalmente realizzati in resina, che fungono da ausilio al riposizionamento dei frammenti ossei durante l'intervento. Vengono creati su misura partendo dalla registrazione del morso del paziente, che viene successivamente scansionato per ottenere il modello 3D ed infine realizzato.

Le guide chirurgiche stampate in 3D (Figura 5) e gli splint dentali (Figura 6) sono strumenti utili e confermati sia nella pianificazione che durante l'intervento, ma presentano alcune problematiche legate all'oneroso dispendio di tempo e di denaro, rendendoli non adatti alle situazioni di emergenza. In questo contesto si colloca la tecnologia della realtà mista (MR) in quanto, un'applicazione MR permetterebbe al chirurgo di visualizzare le linee sul paziente tramite un visore indossabile, senza la necessità di questi dispositivi fisici. [1]

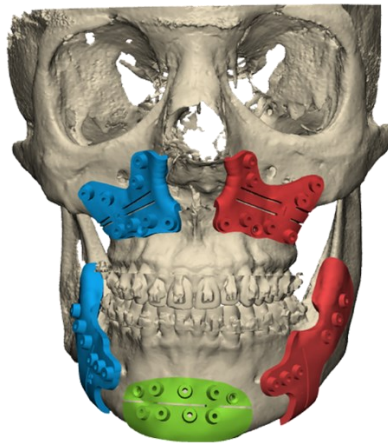


Figura 5 Guide chirurgiche per le osteotomie mascellari e mandibolari

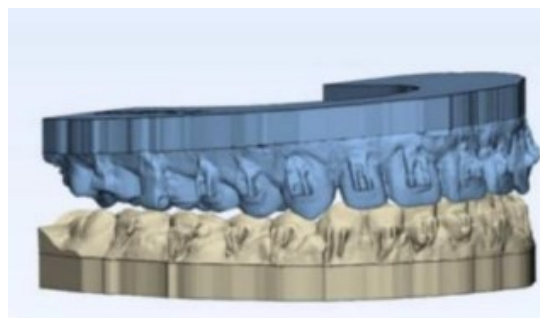


Figura 6 Splint dentale

2.2 Realtà Mista

Lo sviluppo delle nuove tecnologie ha permesso l'emergere di applicazioni sempre più sofisticate per il supporto decisionale in vari ambiti, inclusa la medicina. Per garantire un'interazione semplice ed efficace con questi strumenti, è fondamentale adottare strategie di visualizzazione appropriate [13]. Una tecnologia di realtà mista (MR) è particolarmente rilevante in questo contesto, in quanto permette di unire oggetti virtuali, sia in due che in tre dimensioni, con il mondo reale. Questa tecnologia consente, ad esempio, di visualizzare immagini mediche direttamente nello spazio 3D durante le procedure cliniche, migliorando la guida del medico, soprattutto nei momenti in cui queste informazioni sono cruciali e devono essere facilmente accessibili. [14] Le prime definizioni di realtà mista la presentano come un continuum realtà-virtualità. La Figura 7 mostra che la MR è tutto ciò che si trova tra l'ambiente reale e l'ambiente completamente virtuale. L'obiettivo principale della MR è la creazione di uno spazio ampio, fondendo ambienti reali e virtuali, in cui gli oggetti di queste due dimensioni coesistano e interagiscono in tempo reale per gli scenari utente. [13]

Nel panorama del computing spaziale, esistono diverse tecnologie di realtà-virtualità, tra cui la realtà virtuale (VR), la realtà aumentata (AR) e la realtà mista (MR). La VR immerge completamente l'utente in un ambiente artificiale creato digitalmente, separandolo dalla realtà fisica. L'AR sovrappone contenuti digitali sul mondo reale, arricchendo l'esperienza con informazioni aggiuntive visibili mentre l'utente interagisce con l'ambiente circostante. La MR, infine, rappresenta la fusione di ambienti virtuali e reali, permettendo la coesistenza e l'integrazione tra oggetti fisici e virtuali.

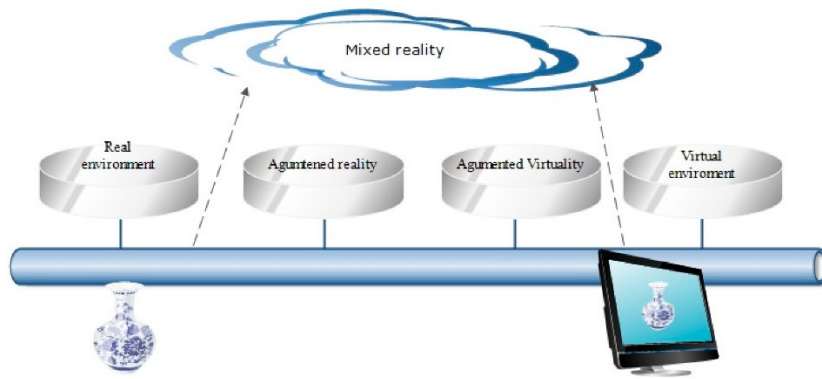


Figura 7 Rappresentazione della Reality–Virtuality continuum [13]

L'adozione di queste tecnologie non solo ottimizza le performance in contesti operativi, ma apre anche la strada a nuove modalità di apprendimento, diagnosi e trattamento, facendo evolvere il modo in cui si interagisce con l'informazione e la realtà. [14]

L'architettura complessiva di un sistema di realtà mista (MR) è complessa e coinvolge l'integrazione di hardware, software, sensori e algoritmi sofisticati per fondere ambienti virtuali e reali su un singolo o più display. Per creare un ambiente MR sono necessari i seguenti passaggi:

1. Creazione di contenuti virtuali: Prima di mescolare il mondo reale e virtuale, i contenuti virtuali devono essere creati tramite software dedicati;
2. Calibrazione: La calibrazione consente di allineare gli oggetti virtuali con il sistema di coordinate degli oggetti reali;
3. Riconoscimento dello spazio: È necessario modellare l'ambiente reale, che può comprendere spazi ampi (stanze) o oggetti tangibili più piccoli;
4. Riconoscimento e tracciamento degli oggetti: Questo permette di integrare il contenuto virtuale nell'ambiente reale;
5. Registrazione e mappatura: L'interazione tra il mondo reale e quello virtuale richiede la mappatura e la registrazione del modello virtuale nello spazio reale;

6. Visualizzazione e rendering: Algoritmi specifici di tipo rendering pipeline sono necessari per visualizzare correttamente il contenuto MR, mantenendo realismo attraverso luci, ombre e dettagli variabili.

Per fare in modo che tutto ciò funzioni, sono necessari dispositivi di input, come sensori di tracciamento (inerziali, ottici, acustici, GPS) che rilevano i movimenti dell'utente e permettono l'interazione con l'ambiente virtuale e dispositivi di output che forniscono un riscontro all'utente, come schermi visivi, dispositivi audio.

Il tracciamento è una parte fondamentale del sistema, poiché consente di monitorare la posizione e l'orientamento degli oggetti nel mondo reale per garantire che il contenuto virtuale sia visualizzato correttamente nel contesto reale. Questo può avvenire tramite sensori o sistemi di visione, come telecamere che utilizzano markers per determinare la posizione esatta. Nel tracciamento basato sull'utilizzo dei markers, questi vengono rilevati dalla telecamera grazie alla quale possono guidare l'algoritmo del computer nel processo di tracciamento.

Infine, la registrazione, ovvero l'allineamento in tempo reale del contenuto virtuale con l'ambiente reale, è un passaggio critico per creare un'esperienza di realtà mista fluida e stabile. Questo processo può essere manuale o automatizzato attraverso algoritmi di visione computazionale, ma l'accuratezza e la stabilità della registrazione sono essenziali per applicazioni in contesti critici, come la chirurgia, dove la precisione è fondamentale. [1]

2.2.1 Tecnologie di supporto: Visori per la realtà mista

Per visualizzare gli ambienti di realtà mista, i display rappresentano componenti fondamentali e possono essere di diverse tipologie, tra cui monitor per PC, televisori, smartphone e tablet, sistemi a display multiplo, e dispositivi indossabili, comunemente noti come visori (HMD).

Ad oggi, l'esperienza di realtà mista viene sperimentata soprattutto mediante l'utilizzo di visori, questi possono essere divisi in due categorie, a seconda del meccanismo di funzionamento: visione ottica diretta e visione tramite video.

I primi consentono all'utente di vedere contemporaneamente l'ambiente reale e virtuale, grazie all'uso di combinatori ottici, specchi semiriflettenti e divisori di fascio davanti agli occhi dell'utente. Gli specchi semiriflettenti sono specchi parzialmente trasmissivi e riflettenti, quindi una parte della luce viene trasmessa mentre il resto viene riflesso. La capacità trasmissiva permette di vedere direttamente il mondo reale, mentre la capacità riflettente consente la percezione del contenuto virtuale. Il contenuto virtuale viene proiettato su un micro-display 2D al di fuori del campo visivo dell'utente, e i raggi luminosi vengono reindirizzati verso l'occhio tramite un combinatore di fascio. Le lenti, collocate tra il combinatore di fascio e il display, permettono di focalizzare le immagini virtuali su una superficie semitrasparente, posizionata alla distanza di visione che risulta comoda per l'utente.

Nei visori a visione diretta tramite video vengono utilizzate telecamere frontali per registrare e digitalizzare la scena, la quale viene poi combinata con il contenuto virtuale. Il contenuto misto viene visualizzato dall'utente tramite due schermi posti davanti a ciascun occhio. Questo dispositivo rende la visione dell'utente limitata al campo visivo della telecamera; qualora le telecamere vengano disattivate, l'utente risulta completamente privo di visione. [1]

Il mercato odierno dispone di diversi tipi di visore che si differenziano per diverse caratteristiche. Si introducono a seguire i due dispositivi utilizzati in questo studio.

2.2.1.1 Microsoft HoloLens 2

Il dispositivo Microsoft HoloLens 2 (Figura 8) permette numerose funzioni avanzate. Le principali caratteristiche descritte dalla casa produttrice Microsoft includono:

- Tracciamento inside-out con mappatura ambientale: il visore riconosce l'area di lavoro, consentendo al contenuto digitale di rimanere ancorato a oggetti o superfici con cui l'utente interagisce;
- Tracciamento della mano: Il dispositivo permette di rilevare e adattare i movimenti delle mani, consentendo di toccare, afferrare, spostare e interagire con gli ologrammi;
- Tracciamento oculare: HoloLens è in grado di rilevare la direzione dello sguardo dell'utente, permettendo di comprendere l'intenzione dell'utente e migliorare l'interazione;
- Comandi vocali: I comandi vocali predefiniti consentono di spostarsi rapidamente e operare quando le mani sono occupate con un'attività;
- Il display ha una risoluzione di 1440x936 per occhio ed una frequenza di aggiornamento di 60 Hz; [15]
- Wireless: Il funzionamento senza fili per una maggiore libertà di movimento.



Figura 8 Microsoft Hololens 2

2.2.1.2 Varjo XR-3

Il dispositivo Varjo XR-3 (Figura 9) è un dispositivo professionale di realtà mista. Le caratteristiche principali esibite dalla casa produttrice Varjo sono:

- Risoluzione: 1920x1920 px per occhio;
- Frequenza di aggiornamento: 90 Hz;
- Tracciamento oculare e regolazione automatica della distanza interpupillare (IPD): il dispositivo gode di un supporto per un tracciamento degli occhi con una frequenza di aggiornamento fino a 200 Hz;
- Ultraleap Gemini Hand Tracking: Tecnologia di tracciamento delle mani di quinta generazione per un'esperienza di interazione avanzata;
- Ergonomia: Il design leggero e la disponibilità di regolare la fascia per la testa permettono l'adattabilità;
- Connettività USB: il dispositivo è compatibile con una vasta gamma di computer desktop Windows 10. [16]



Figura 9 Varjo XR-3

2.3 Impiego della Realtà Mista nella medicina

L'uso della MR in medicina è considerata una tecnologia dirompente, con potenziali applicazioni nella riabilitazione del paziente, nell'educazione medica, nella formazione, nella pianificazione chirurgica e per guidare procedure complesse.

Nella riabilitazione, numerosi studi evidenziano come l'impiego della realtà mista possa offrire una maggiore motivazione nei pazienti che hanno subito un ictus, infarti o che stanno recuperando da traumi o infortuni. Questi pazienti, infatti, si ritrovano a dover affrontare la monotonia degli esercizi riabilitativi, il che può comportare una diminuzione del coinvolgimento nel processo di recupero. La realtà mista, integrando elementi virtuali con il mondo reale, può rendere gli esercizi più coinvolgenti e stimolanti, promuovendo una partecipazione attiva e continua, come si vede in Figura 10. [17] [19]

La MR rappresenta una soluzione anche nell'insegnamento e nella formazione degli studenti di medicina e dei professionisti sanitari, in quanto consente una visualizzazione tridimensionale del corpo umano, permettendo una migliore comprensione delle strutture anatomiche (Figura 11).

Determinate applicazioni permettono l'interazione diretta con le immagini, offrendo la possibilità di manipolare e visualizzare gli oggetti anatomici attraverso operazioni di rotazione, attivazione di livelli, nonché la regolazione del contrasto e della trasparenza. Inoltre, il docente o chirurgo, durante l'esecuzione di una procedura chirurgica usando un visore, può proiettare la propria prospettiva su un monitor, consentendo agli studenti di vivere l'intervento da una visione in prima persona. Diversi studi hanno esaminato l'efficacia dell'insegnamento mediante questa tecnologia in diversi ambiti medici, quali chirurgia, medicina d'urgenza, odontoiatria, urologia, ginecologia, anatomia ed oftalmologia, evidenziando risultati positivi da parte degli studenti sottoposti alla valutazione. [1][20]

Nella pianificazione chirurgica, la MR permette la creazione di modelli 3D personalizzati basati sull'anatomia del singolo paziente, in modo tale che i chirurghi possano simulare l'intervento prima dell'effettiva esecuzione, permettendo di prevedere il risultato e determinare il miglior approccio. Le simulazioni preoperatorie in MR (Figura 12) non solo aumentano la preparazione dei chirurghi, ma ottimizza anche l'esito dell'intervento, riducendo margini di incertezza. Inoltre, la MR è particolarmente utile nel supportare la localizzazione delle strutture anatomiche durante la pianificazione chirurgica. La tecnologia MR è già stata utilizzata con successo come strumento di pianificazione in diversi scenari chirurgici, tra cui urologia, chirurgia toracica, neurochirurgia, chirurgia coloretale e chirurgia bariatrica.

Durante l'esecuzione di interventi chirurgici, i dispositivi MR offrono la possibilità di sovrapporre informazioni virtuali, come modelli 3D o immagini olografiche, direttamente sul corpo del paziente in tempo reale (Figura 13). Questo approccio fornisce al chirurgo una guida visiva durante l'esecuzione della procedura, migliorando la precisione e riducendo la necessità di usare altri tipi di dispositivi di visualizzazione tradizionali, come monitor o schermi esterni. L'applicazione della MR si è rivelata efficace in vari tipi di interventi, tra cui la chirurgia spinale, radiologia interventistica,

chirurgia ortopedica e chirurgia endoscopica. In questi contesti, la tecnologia MR è stata di supporto del chirurgo nella navigazione anatomica e nella visualizzazione delle strutture interne con un livello di dettaglio e precisione superiore.[18]



Figura 10 Riabilitazione con ausilio di un'applicazione MR

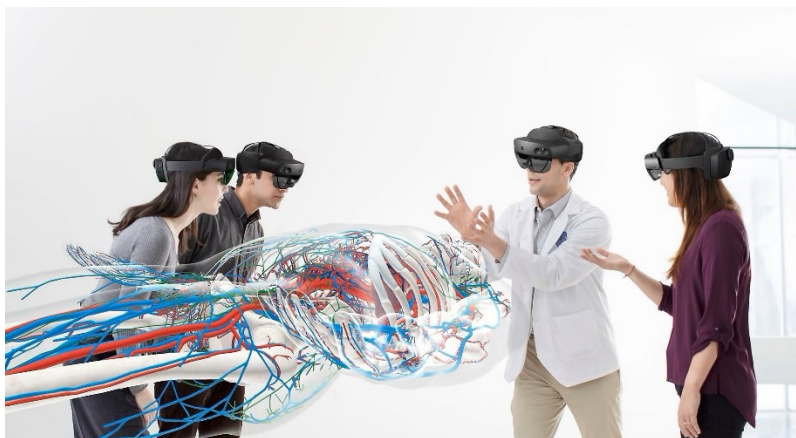


Figura 11 Visualizzazione del corpo umano per scopi didattici con un'applicazione MR



Figura 12 Pianificazione preoperatoria con un'applicazione MR

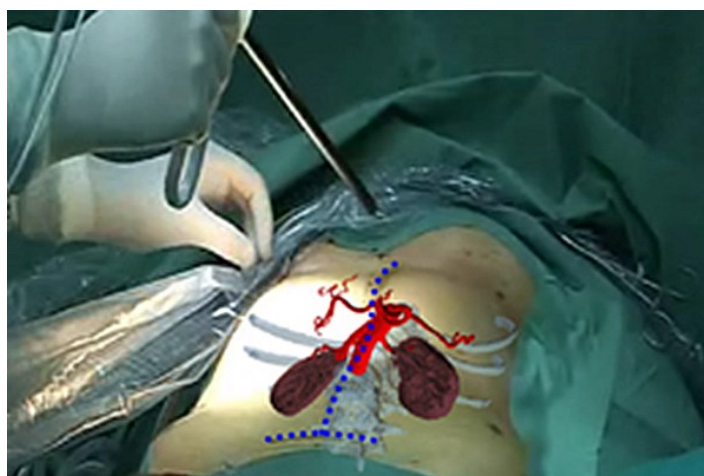


Figura 13 Visualizzazione organi mediante MR

3. Metodo

In questo capitolo viene fornita una panoramica delle fasi di elaborazione dei dati utilizzati nel presente studio, strutturato in diverse sezioni interconnesse. In primo luogo, vengono descritti i prototipi fisici della mascella e della mandibola utilizzati, seguiti dalla presentazione del test, comprendente gli obiettivi, la procedura ed i risultati ottenuti. Successivamente, vengono introdotti i software di elaborazione dati impiegati: MeshLab, Rhinoceros e CloudCompare, con una sintesi delle loro caratteristiche. Il capitolo prosegue con l'approccio utilizzato per andare a valutare e stimare l'accuratezza con cui gli ologrammi visionati dagli utenti partecipanti al test rispecchino le strutture anatomiche del modello di riferimento.

3.1 I prototipi fisici

Per l'esecuzione dello studio sono stati impiegati dei prototipi fisici rappresentanti le ossa della mascella e della mandibola e i due tipi marker relativi ai due visori impiegati. La progettazione dei modelli è stata eseguita mediante il software Rhinoceros. Successivamente i prototipi sono stati realizzati tramite stampa 3D: le parti monocolori con la stampante 3D Objet30 di Stratasys, quelle colorate sono state ottenute mediante una stampa a getto di materiale. Il materiale utilizzato è un composto di resina. I marker sono stati applicati su dei cubi (32.13x32.13x32.13 mm) i quali non sono saldi ai prototipi, ma si legano ad incastro ai modelli di mandibola e mascella. La configurazione del marker è costituita da una cornice di centraggio progettata per garantire un allineamento di massima, mentre l'incastro della parte terminale ha l'obiettivo di minimizzare i movimenti. Nonostante ciò, si è osservato un leggero movimento rotazionale tra le due parti, possibilmente attribuibile sia alla flessibilità intrinseca dei materiali utilizzati per la stampa, sia a piccole tolleranze residue nella geometria delle componenti.

3.2 Il test

Il test ha previsto la simulazione di un intervento di osteotomia sui prototipi fisici della mascella e della mandibola in un ambiente di realtà mista, utilizzando i visori HoloLens 2 e Varjo XR-3. Nove utenti hanno seguito gli ologrammi delle curve di taglio previste dagli interventi con una matita su del nastro adesivo. Le curve di taglio sono relative agli interventi di avanzamento mandibolare, genioplastica e di osteotomia dell'angolo mandibolare per l'osso della mandibola. Per la mascella sono state eseguite le linee di taglio di Le Fort I e dei fori ossei, quest'ultimi sono generalmente utilizzati per fissazione ossea o di guida per il taglio.

Prima di eseguire le curve, il dispositivo mette a disposizione un menù sul quale bisogna indicare quale tipo di curve visualizzare (Figura 14 e Figura 15), dopodiché una volta che il dispositivo ha effettuato la calibrazione, grazie al riconoscimento del marker, queste appariranno all'utente posizionate sul prototipo.

La Figura 16, la Figura 17 e la Figura 18 mostrano la visuale dell'utente, il quale è intento nel seguire l'ologramma (in azzurro) delle curve e dei fori ossei per la mascella e per la mandibola. Ogni utente ha svolto il compito posizionando e riposizionando i marker ogni volta che veniva utilizzato un visore diverso per i due prototipi, andando così ad ottenere dei risultati di ciascun anche in una situazione di non idealità.

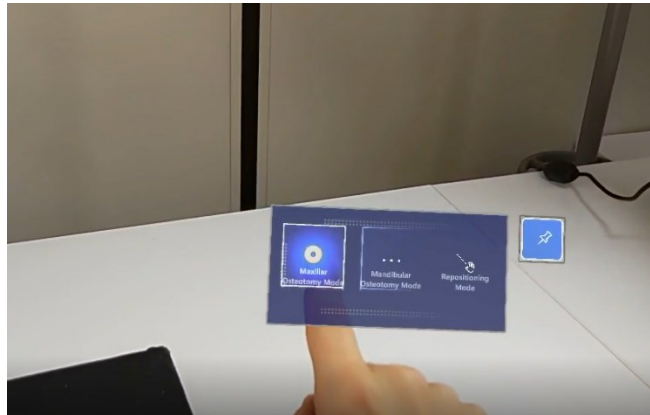


Figura 14 Selezione Modalità con HoloLens 2

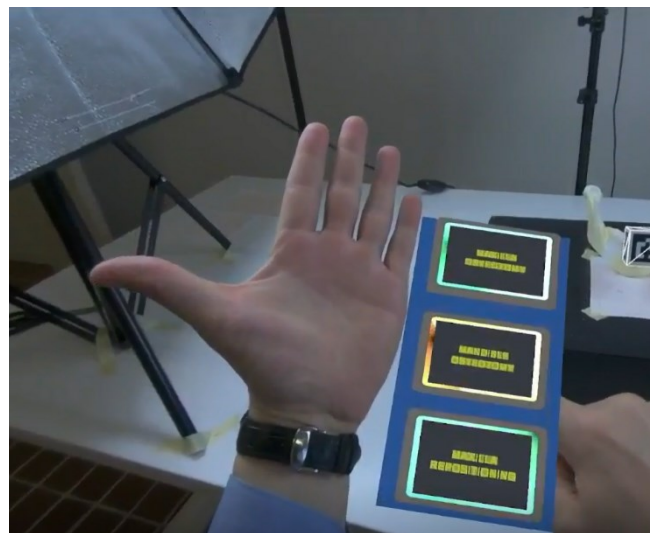


Figura 15 Selezione Modalità con Varjo XR-3

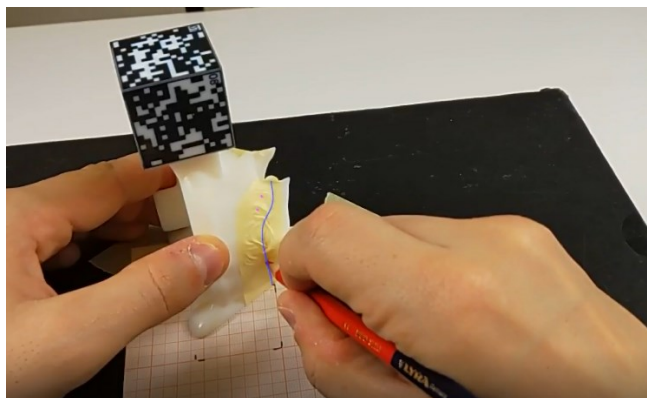


Figura 16 Esecuzione curve di taglio per l'osteotomia della mascella con HoloLens 2

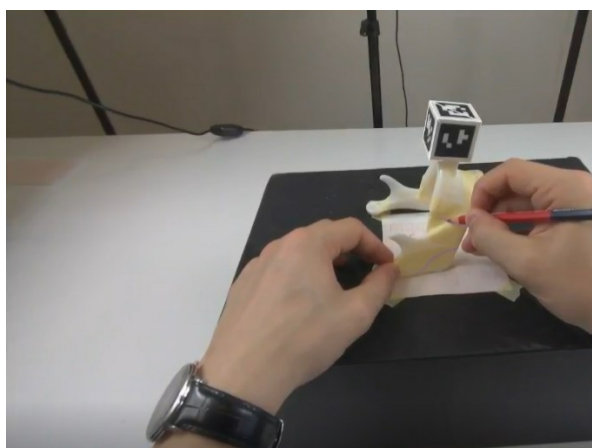


Figura 17 Esecuzione curve di taglio per osteotomia della mandibola con Varjo XR-3

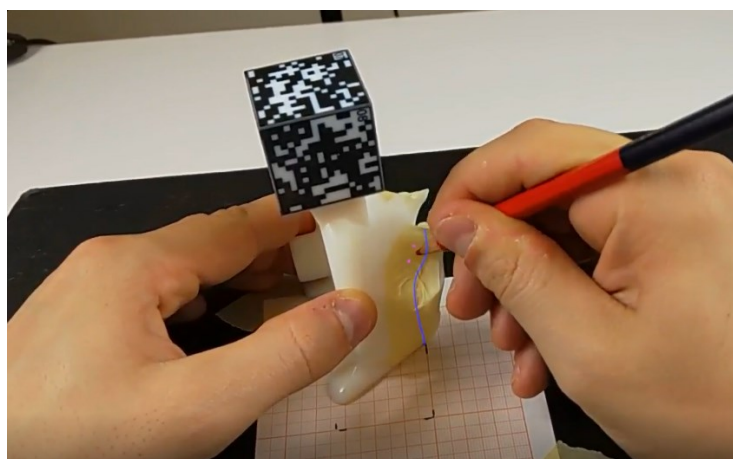


Figura 18 Esecuzione dei fori ossei sulla mascella con HoloLens 2

Per la validazione dello studio, l'obiettivo è confrontare le linee di taglio e i fori ossei tracciati dagli utenti sui modelli con le linee di taglio e i fori nominali, al fine di estrarre infine le deviazioni. Per realizzare la validazione, i prototipi testati devono essere scansionati e successivamente le scansioni devono essere elaborate per ottenere un file CAD texturizzato su cui le linee di taglio e i fori perforati siano visibili e possano essere ricostruiti.

Il primo passo per la validazione consiste nella fase di scansione, tramite il dispositivo Go!Scan3D. Il piano di riferimento è costituito da un tavolo bianco appositamente preparato con l'applicazione di piccoli marker adesivi circolari. I prototipi con le linee di taglio disegnate dai tester sono stati posizionati sul piano di riferimento e la scansione acquisita viene elaborata per rimuovere rumore e punti non necessari. [2] La Figura 19 e la Figura 20 mostrano come appaiono i prototipi scannerizzati sul software Rhinoceros.

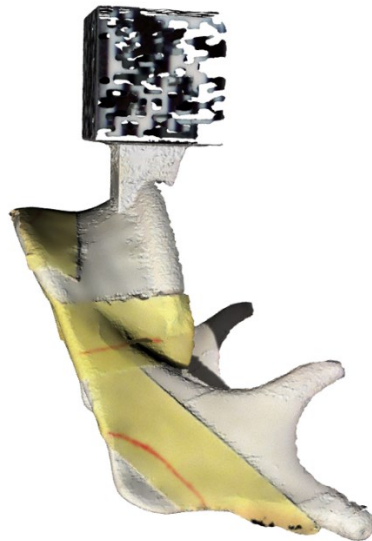


Figura 19 Prototipo mandibola scannerizzato

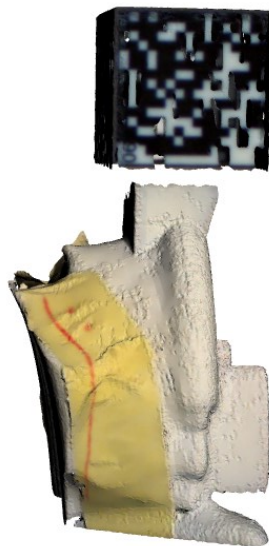


Figura 20 Prototipo mascella scannerizzato

3.3 Software di elaborazione dati

In questo sottocapitolo vengono introdotti i software di elaborazione dati utilizzati in questo studio per il confrontare le geometrie virtuali e nominali, che hanno permesso di eseguire le operazioni di allineamento, misurazione degli scostamenti, visualizzazione delle differenze tra i modelli e manipolazione delle curve, per ottenere una comparazione accurata. In questo contesto si lavora con mesh poligonali, ossia reticoli che definiscono un oggetto nello spazio, composto da vertici, spigoli e facce.

3.3.1 MeshLab

MeshLab è un sistema open source per l'elaborazione e la modifica di mesh poligonali 3D. Il software fornisce un set di strumenti per modificare, pulire, riparare, ispezionare, renderizzare, texturizzare e convertire le mesh. Offre funzionalità per elaborare i dati grezzi prodotti dagli strumenti/dispositivi di digitalizzazione 3D e per preparare i modelli per la stampa 3D. [24]

3.3.2 Rhinoceros

Rhinoceros consente di creare, modificare, analizzare, documentare, renderizzare, animare curve, superfici, solidi, nuvole di punti e mesh poligonali. Non ci sono limiti di complessità, grado o dimensioni, oltre a quelli del relativo hardware. [25]

3.3.3 CloudCompare

CloudCompare è un software per l'elaborazione di nuvole di punti 3D (e mesh poligonali). È stato progettato per essere un software di elaborazione di nuvole di punti generico, includendo numerosi algoritmi avanzati (registrazione, campionamento, gestione di colori/normalità/campi scalari, calcolo delle statistiche, gestione dei sensori, segmentazione interattiva o automatica, miglioramento del display, ecc.). [26]

3.4 Approccio di elaborazione dati

L'approccio per studiare i dati ottenuti dal test ha lo scopo di andare a comparare le geometrie nominali e virtuali dei prototipi, ossia le mesh, delle curve, e dei fori, al fine di estrarre la qualità della scansione, la precisione con cui gli ologrammi sono proiettati e seguiti dall'utente. Per fare ciò si calcola la media e la deviazione standard della distanza tra il modello reale e nominale, mediante i passi della Figura 21. Raccolti tutti i risultati, questi a forniranno una panoramica complessiva dell'affidabilità dei visori.

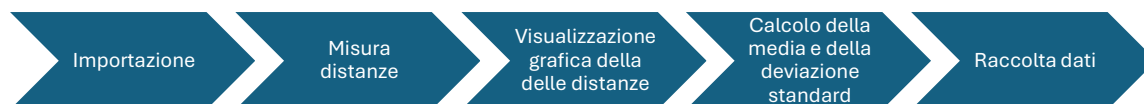


Figura 21 Workflow complessivo del lavoro

3.4.1 Verifica della qualità della scansione: Allineamento

Come primo passo di questo approccio è stata effettuata una verifica dell'allineamento delle mesh e delle curve di taglio, in modo tale da appurare che la geometria scansionata sia effettivamente allineata, e quindi conforme, alla geometria nominale di riferimento. A tale scopo, è stato utilizzato il software MeshLab per calcolare la divergenza tra i due modelli. Tale approccio è stato eseguito alla stessa maniera sia per la mascella che per la mandibola, così come per le curve ottenute dai nove utenti.

Il procedimento si articola nelle seguenti fasi:

1. Importazione della geometria di riferimento e della geometria scansionata: Per l'importazione delle geometrie scansionate si è inizialmente effettuata una conversione di formato in .stl in quanto, i risultati sono stati forniti in formato .Rhino-3D-Model (.3dm), un formato nativo del software Rhinoceros. Questo formato non è direttamente compatibile con MeshLab, quindi si è reso necessario effettuare una conversione del formato in .stl (stereolithography), che è un formato utilizzato nella modellazione 3D e supportato da MeshLab;

Per eseguire la conversione, è stato utilizzato il software Rhinoceros, che ha permesso di aprire i file .3dm e di esportarli nel formato .stl. Una volta convertiti i file, i due modelli 3D (la geometria di riferimento e la geometria scansionata) sono stati importati in MeshLab. Il riferimento era già disponibile in formato .stl, quindi non è stata necessaria alcuna conversione per questo modello. Entrambi i modelli sono stati caricati nel software e sovrapposti. L'operazione di sovrapposizione serve per allineare le geometrie delle due mesh in modo che siano correttamente posizionate nello stesso sistema di coordinate. Questo permette di visualizzare eventuali differenze tra i modelli e

di procedere con le fasi successive di analisi, come il calcolo delle distanze tra i vertici delle due mesh;

2. Calcolo delle distanze tra i vertici della mesh di riferimento e di quella scansionata: Per avere una misura di quanto i due modelli divergono, ed avere una misura oggettiva della precisione della scansione, viene usata la funzione *Distance From Reference Mesh*. Si accede a questa funzione: Filters → Sampling → Distance from Reference Mesh. Una volta selezionata la funzione, il software richiede di specificare quale mesh deve essere considerata di riferimento in quanto rappresenta il modello "ideale" che funge da base per il confronto. In questo caso, il riferimento è la geometria nominale che viene confrontata con la scansionata. La funzione calcola la distanza tra ogni vertice della mesh di riferimento e il vertice più vicino della mesh scansionata. È importante sottolineare il calcolo avviene punto per punto, vertice per vertice, in modo da determinare con precisione le discrepanze tra i modelli. Il risultato del calcolo è una serie di valori numerici che rappresentano le distanze tra i vertici corrispondenti delle due mesh. Queste distanze, per questo studio, sono state espresse in millimetri. I valori risultanti non solo forniscono una misura quantitativa delle divergenze, ma possono anche essere utilizzati per ottenere una visualizzazione grafica delle discrepanze;
3. Colorazione dei vertici del modello scansionato sulla base delle distanze calcolate: Per rappresentare graficamente le distanze è stata utilizzata la funzione *Colorize by Vertex Quality* che permette di associare un colore specifico a ciascun vertice della mesh scansionata, in base alle distanze calcolate precedentemente. Si accede mediante: Filters → Color Creation and Processing → Colorize by Vertex Quality.

Le aree che presentano una divergenza minore vengono colorate con tonalità calde come il rosso o l'arancione, mentre le zone che presentano distanze più elevate vengono colorate con tonalità

fredde come il blu o il verde. In questo modo è possibile identificare nell'immediato le aree "problematiche" della mesh scansionata e quelle che sono fedeli al riferimento;

4. Generazione dell'istogramma delle distanze tra i vertici: Per avere una misura quantitativa delle discrepanze, un ulteriore strumento di supporto è l'istogramma, in quanto fornisce una visione complessiva della qualità della scansione e permette di identificare tendenze generali nel confronto tra i modelli. Per generarlo: Render → Show Vertex Quality Histogram. Esso presenta sull'asse verticale i valori di distanza, mentre sull'asse orizzontale riporta la frequenza di ciascun valore. L'interpretazione dell'istogramma è fondamentale: un picco concentrato a bassi valori di distanza indica una buona accuratezza complessiva della scansione, con la maggior parte dei vertici della mesh scansionata vicini alla mesh di riferimento. Un picco a valori di distanza elevata segnala invece, zone in cui la scansione si discosta significativamente dal riferimento, indicando quindi la presenza di eventuali errori di scansione o distorsioni.

Una buona scansione viene riportata nella Figura 22 e nella Figura 23, nelle quali si evidenziano picchi in corrispondenza di valori vicini allo zero;

5. Salvataggio dei risultati: Per garantire la fruibilità dei risultati, il lavoro è stato salvato ed esportato in formato .ply e in .mlp.

Il primo formato consente di ottenere un file numerico organizzato in colonne (Figura 24) dove, le prime tre colonne riportano i valori delle coordinate 3D (x-y-z) di ogni vertice, le successive tre, i colori associati a ciascun vertice (r-g-b) [27], e l'ultima colonna la qualità dei vertici, ossia le discrepanze dei vertici virtuali e i corrispondenti nominali.

Il formato .mlp invece, è un formato nativo di MeshLab e consente di salvare il progetto di lavoro realizzato mediante il software.

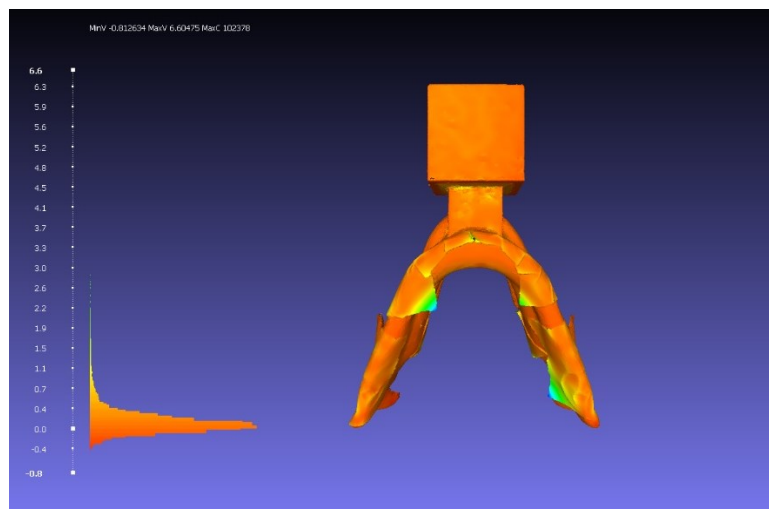


Figura 22 Verifica qualità Scansione, mandibola (Hololens) 1

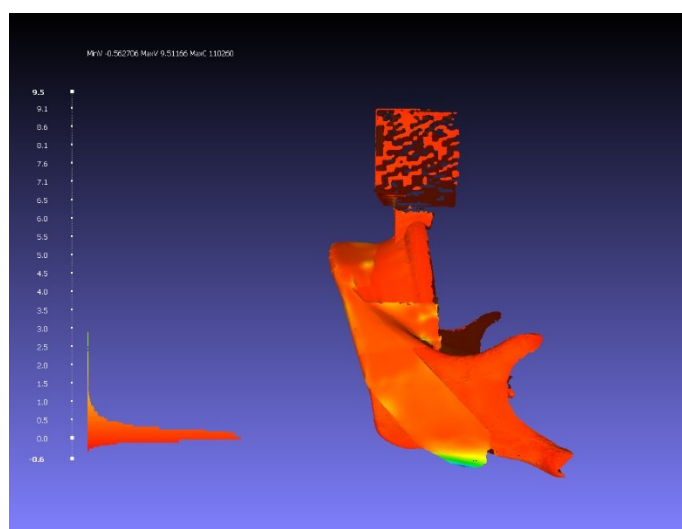


Figura 23 Verifica qualità della scansione, mandibola (Varjo XR-3) 2

```

ply
format ascii 1.0
comment VCGLIB generated
element vertex 1200159
property float x
property float y
property float z
property uchar red
property uchar green
property uchar blue
property uchar alpha
property float quality
element face 400053
property list uchar int vertex_indices
end_header
34.10477 -101.8999 -44.83463 255 60 0 255 0.03835249
34.11261 -101.8482 -45.0385 255 61 0 255 0.04354811
34.16219 -102.108 -44.89558 255 61 0 255 0.04552412
34.15865 -102.1849 -44.6535 255 60 0 255 0.03859615
34.09687 -101.9706 -44.58839 255 60 0 255 0.0357151
34.16219 -102.108 -44.89558 255 61 0 255 0.04552412
45.55996 -102.9398 -30.64529 255 61 0 255 0.04656982
45.5024 -103.0013 -30.85435 255 58 0 255 0.01900482
45.71655 -102.8142 -30.69632 255 64 0 255 0.07176208
15.91078 12.5489 -5.809441 255 41 0 255 -0.1542168

```

Figura 24 Esempio file .ply

3.4.2 Verifica della congruenza delle curve di taglio reali sulla superficie della mesh nominale

Per escludere la possibilità che le curve di taglio non fossero correttamente visualizzate sulla superficie dei prototipi, è stato eseguito un procedimento di verifica su MeshLab. Confrontando le curve scansionate di ogni singolo utente con le mesh di riferimento, è possibile valutare quanto queste si discostano dalla superficie a livello tangenziale o ortogonale. Il procedimento è stato eseguito per tutte le curve di taglio in analisi per l'osso della mandibola e della mascella.

In questo contesto il procedimento di articola in:

1. Importazione della mesh di riferimento e della curva scansionata: Il modello di riferimento è stato importato sul software il formato .stl, mentre le curve scansionate sono state fornite in formato .obj. Quest'ultime sul software, dato il loro formato, risultano ruotate di 90° sul piano delle ascisse rispetto alla mesh nominale. Ciò significa che la loro orientazione rispetto il sistema di coordinate non è allineata, impendendo così una comparazione diretta. A tal proposito, è stata eseguita una

rotazione delle curve scansionate per allinearle. Dopo aver selezionato la curva d'interesse si procede con il comando: Manipulators Tool $\rightarrow$ R $\rightarrow$ X $\rightarrow$ 90;

2. Calcolo della distanza tra le due geometrie: per quantificare quanto le curve fossero distanti dalla superficie nominale, si è adoperata la funzione *Distance From Reference Mesh*, dove anche in questo caso, la mesh di riferimento richiesta dalla funzione è la geometria nominale dei prototipi. La funzione, come sopraccitato nel paragrafo 3.4.1, fornisce un reticolo di distanze che permette di visualizzare graficamente una mappa di discrepanze tra i due modelli, applicando successivamente un filtro;
3. Colorazione della curva scansionata sulla base delle distanze calcolate: applicando il filtro di colore vengono evidenziate le zone della curva che sono meno aderenti e più aderenti alla superficie di riferimento (Figura 25 e Figura 26). I criteri di colore restano gli stessi dei sopraccitati nel capitolo 3.4.1;
4. Creazione dell'istogramma della distanza tra i vertici delle due geometrie: I criteri dell'inserimento dell'istogramma restano gli stessi citati nel punto 4 del capitolo 3.4.1;
5. Salvataggio dei risultati: i risultati sono stati salvati sempre in ambo le modalità: .ply e .mlp. Questa volta il formato .ply fornirà un file numerico di undici colonne, dove l'undicesima colonna fornisce i dati di interesse per lo studio, ossia i valori delle distanze dei vertici tra i due modelli.

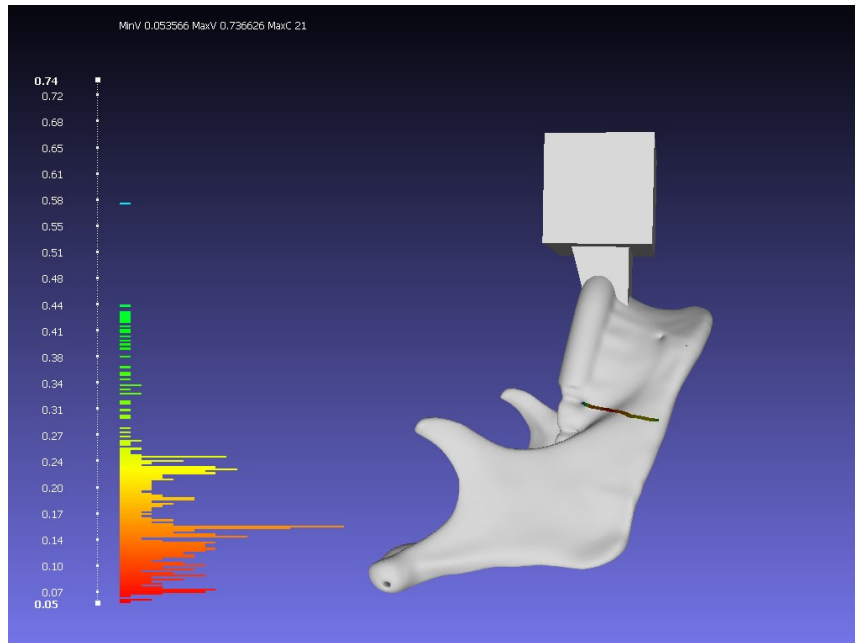


Figura 25 Curva di taglio sulla mandibola (Ortognatica)

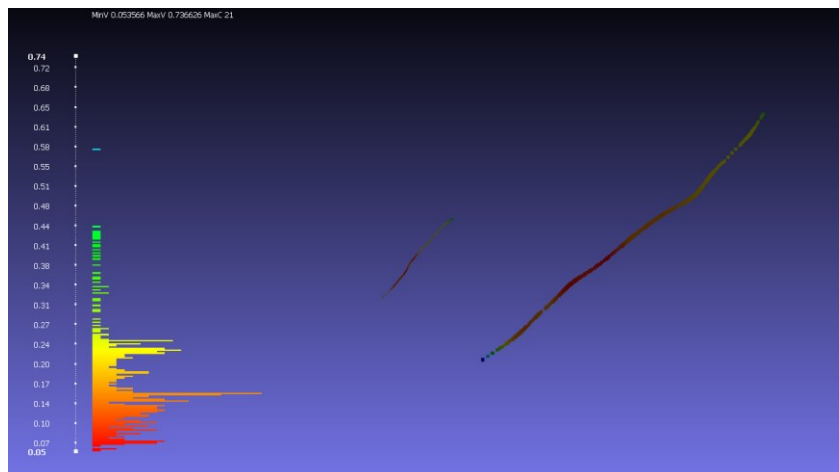


Figura 26 Curva di taglio sulla mandibola (Ortognatica) 2

3.4.3 Analisi delle simmetrie delle curve

Un aspetto cruciale da analizzare in questo studio è la simmetria delle curve scansionate. A seguire vengono presentate diverse verifiche che hanno questo obiettivo in comune.

Quest'analisi permette non solo di verificare la correttezza del set-up del visore, ma anche di valutare l'accuratezza del visore nella sua interezza. Ovviamente la valutazione della simmetria è stata fatta sia per la mascella che per la mandibola, nei i casi in cui si ha un intervento che richiede due curve di taglio, idealmente speculari, escludendo quindi, l'intervento di genioplastica in quanto comprende una singola curva di taglio.

3.4.3.1 Verifica della congruenza tra le curve scansionate specchiate e le curve nominali

Come primo passo della verifica della simmetria è stata valutata la discrepanza tra le curve scansionate specchiate e le curve nominali. Si adopera un confronto mediante curve specchiate in quanto, specchiando la curva scansionata rispetto al piano di simmetria e confrontandola con la curva nominale, si verifica se il processo di acquisizione ha rispettato la simmetria originale del modello. Eventuali discrepanze potrebbero indicare: difetti nel processo di scansione nonché problemi del modello fisico. In particolare, si è scelto di specchiare e confrontare la curva destra con la curva nominale sinistra. Il procedimento è stato effettuato anche per la casistica complementare per una breve verifica. I passaggi necessari sono i seguenti:

1. Specchiatura ed esportazione della curva scansionata: Il procedimento di specchiatura è stato eseguito utilizzando Rhinoceros. Per questo processo, si è partiti da un file .3dm contenente le informazioni geometriche delle scansioni eseguite per ogni utente durante il test. La specchiatura è stata eseguita rispetto al piano Y-X mediante il comando *Copia Speculare*. In Figura 27 viene mostrata la curva specchiata (in giallo) che è stata selezionata per essere esportata in formato .obj mediante il comando: File → Esporta Selezione, in modo tale che venga garantita la compatibilità con i software di analisi successivi;

2. Importazione delle geometrie nominali e scansionate: le curve nominali e reali vengono poi importate su MeshLab, essendo la curva reale in formato .obj, viene ruotata per adeguarsi al sistema di riferimento della nominale (in formato .stl) secondo le modalità sopracitate nel paragrafo 3.4.2. assicurando la corretta sovrapposizione e allineamento per la fase di analisi. La Figura 28, mette in evidenza come le due curve sono sovrapposte;
3. Confronto tra le due curve: Il confronto tra le due curve è stato eseguito misurando la distanza che la curva reale presenta rispetto la nominale, secondo le modalità del punto 2 del paragrafo 3.4.1. Il risultato ottenuto va a quantificare quanto l'ologramma viene visualizzato correttamente rispetto al riferimento, constatando la fedeltà con cui l'utente ha eseguito la curva;
4. Visualizzazione dei risultati: i risultati ottenuti possono e essere visualizzati graficamente attraverso l'applicazione del filtro di colore basato sulla distanza della curva scansionata rispetto la curva di riferimento, secondo i criteri del punto 3 paragrafo 3.4.1 e per una misura quantitativa complessiva si può generare un istogramma, in aderenza alle considerazioni del punto 4 del paragrafo 3.4.1. La visualizzazione grafica di questo passaggio è mostrata in Figura 29.

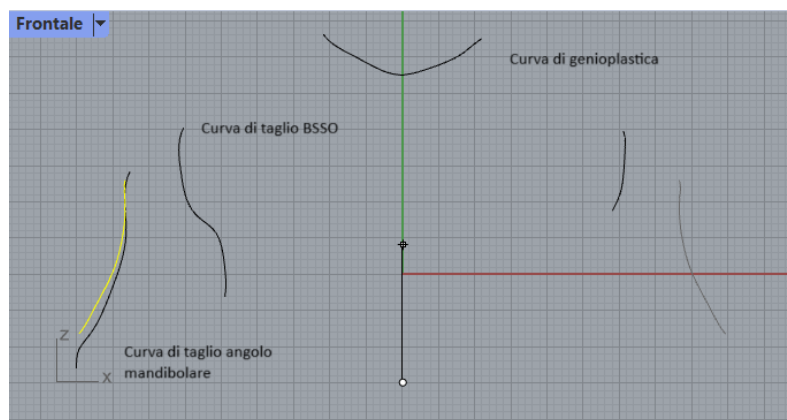


Figura 27 Visualizzazione curva specchiata angolo mandibolare (in giallo)

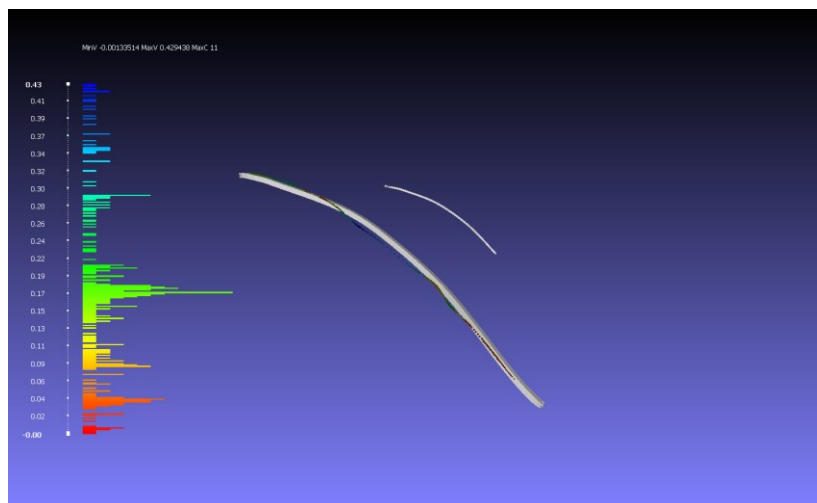


Figura 28 Sovrapposizione ed analisi curve, angolo mandibolare

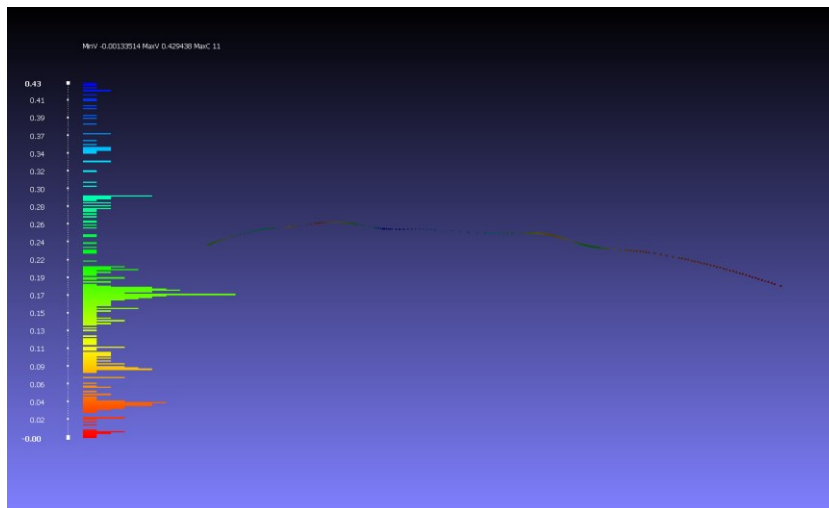


Figura 29 Analisi curva reale, angolo mandibolare

3.4.3.2 Verifica della qualità dell'ologramma visionato

Questa analisi vuole comparare le due curve reali per valutare quantitativamente la simmetria tra le due. Il procedimento è stato effettuato per due casistiche differenti. La prima tiene conto anche di eventuali off-set, probabilmente dovuti all'ottica del visore, e non valuta la qualità dell'ologramma in senso stretto. La seconda, invece, si concentra esclusivamente sulla qualità dell'ologramma in

quanto, prima di misurare la discrepanza tra le due curve viene eseguito un allineamento best-fit tra le due, escludendo così la presenza di eventuali off-set. Nella pratica, questo approccio fornisce una stima dell'esito di un intervento in condizioni di test e in condizioni di quasi idealità.

Per ambo gli aspetti analizzati sono state utilizzate le curve specchiate destre, (ottenute alla stessa maniera del punto 1 del paragrafo 3.4.3.1) e le rispettive curve sinistre. La Figura 30 mostra il procedimento effettuato nel caso delle curve di taglio dell'angolo mandibolare; in modo analogo è stato eseguito per le altre curve della mandibola e per la mascella.

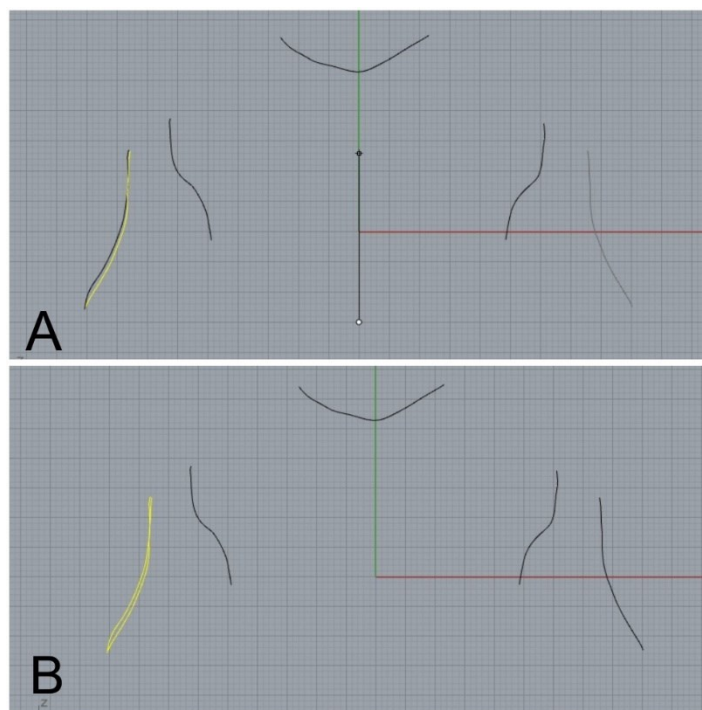


Figura 30 Processo di esportazione delle curve di taglio dell'angolo mandibolare: A) Specchiatura curva; B) Selezione curve da esportare

Nel primo caso sopraccitato, l'analisi è avvenuta utilizzando MeshLab, mentre nel secondo caso CloudCompare. I risultati di entrambe le verifiche consistono nella misura dello scostamento medio che sussiste tra le due curve.

Il primo caso consiste nell'importazione delle due curve di taglio previste per gli interventi di avanzamento mandibolare, osteotomia dell'angolo mandibolare e osteotomia della mascella superiore, entrambe in formato .obj, poi tramite la funzione *Distance From Reference Mesh* si misurano gli scostamenti tra i vertici delle due curve, permettendo di valutare quantitativamente la simmetria tra le due curve. La visualizzazione grafica delle distanze e il salvataggio del lavoro è analogo alle verifiche precedenti. La Figura 31 mostra il risultato.

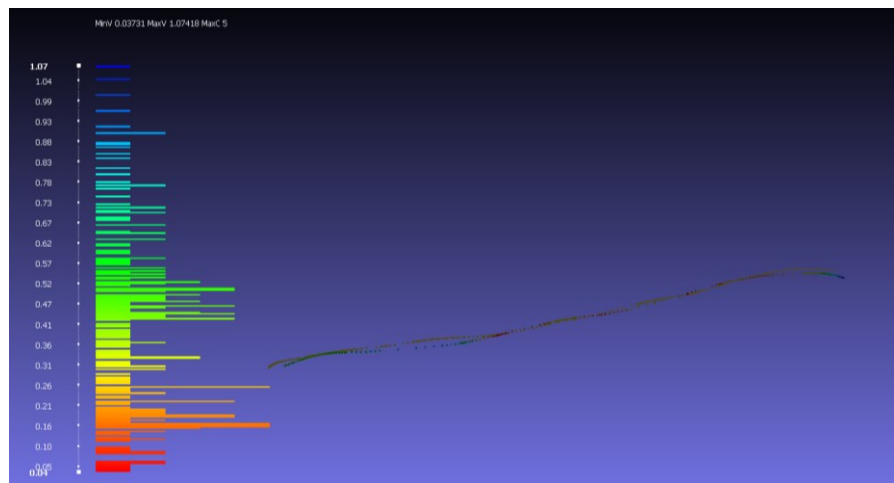


Figura 31 Analisi simmetria su MeshLab, angolo mandibolare

Nel secondo caso, invece, si importano le stesse curve su CloudCompare e si esegue un allineamento best-fit mediante il comando *Finely registers already aligned entites*. Questo comando permette di ottimizzare la posizione delle curve, minimizzando la distanza tra i punti corrispondenti delle due curve stesse. In pratica, l'allineamento best-fit cerca di trovare la trasformazione (traslazione e rotazione) che allinea le curve in modo da ridurre al minimo le discrepanze tra di esse. Una volta eseguito l'allineamento, viene calcolata la distanza media tra le due curve. Questo viene fatto tramite la funzione *Compute cloud/cloud distance*, che misura la distanza tra ogni punto di una nuvola di punti (o curva) e la più vicina parte dell'altra nuvola (o curva). Dunque, anche CloudCompare

restituisce una mappa delle distanze tra i punti delle due curve allineate, consentendo di visualizzare le aree in cui le due curve si sovrappongono bene e quelle in cui esistono discrepanze più evidenti (Figura 32). [28]

Il risultato di questa operazione è una misura della differenza complessiva tra le due curve, espressa come distanza media.

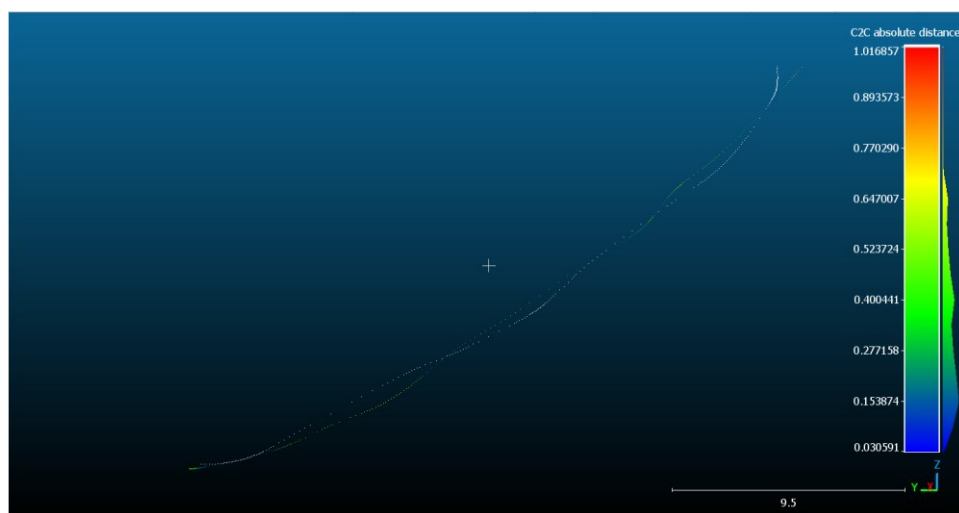


Figura 32 Analisi simmetria su CloudCompare, angolo mandibolare

3.4.4 Margine di miglioramento teorico nella genioplastica

Per andare a completare il quadro inerente ad un approccio in grado di valutare il margine di miglioramento teorico possibile che si potrebbe avere in condizioni ideali, è stata effettuata una verifica sulla curva di taglio dell'intervento di genioplastica.

Il procedimento è stato effettuato mediante CloudCompare. Il confronto è avvenuto tra la curva di taglio nominale e la curva scansionata di ciascun utente per ogni visore. Mediante l'allineamento con un approccio best-fit delle due curve (ottenuto in modo analogo al secondo caso del paragrafo

precedente) e la misura dell'errore medio che sussiste tra le due, è stato possibile individuare l'affidabilità che si potrebbe avere in condizioni prive di off-set. La Figura 33 mostra la vista dell'utente dove con tonalità di colore fredde sono stati evidenziati i discostamenti minori, con le calde quelli maggiori.

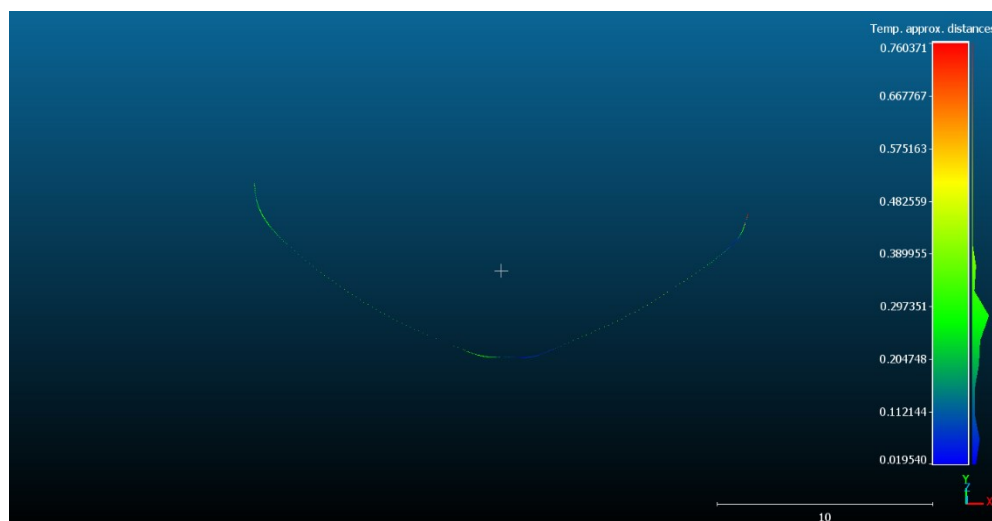


Figura 33 Mandibola-Genioplastica, qualità ologramma, approccio best-fit

3.4.5 Verifica della lunghezza dell'interasse tra i fori mascellari

Per completare l'analisi delle procedure chirurgiche in esame, è stata effettuata una verifica sulla visualizzazione dei fori ossei della mascella. La Figura 34 A mostra i fori scansionati in verde, mentre in bianco i fori di riferimento. Utilizzando Rhinoceros, è stata misurata la lunghezza dell'interasse (visibile in verde nella Figura 34 B) che congiunge i fori reali tramite la funzione *Distanza*, sia per il lato sinistro che per il lato destro del prototipo della mascella. Il fine di questo procedimento è il confronto di tale misura con la lunghezza dell'interasse che unisce i fori di riferimento, per verificare se i visori sono in grado di proiettare i due punti reali alla giusta distanza l'uno dall'altro sui prototipi. Per estrarre l'errore, viene calcolata una media delle distanze dei fori destri e sinistri, per poi prendere il valore assoluto della differenza tra questa e il riferimento. Questo confronto è essenziale per

valutare l'accuratezza della proiezione, in quanto una differenza significativa rispetto la lunghezza nominale, può indicare una distorsione nella visualizzazione nonché errori nella calibrazione del sistema.

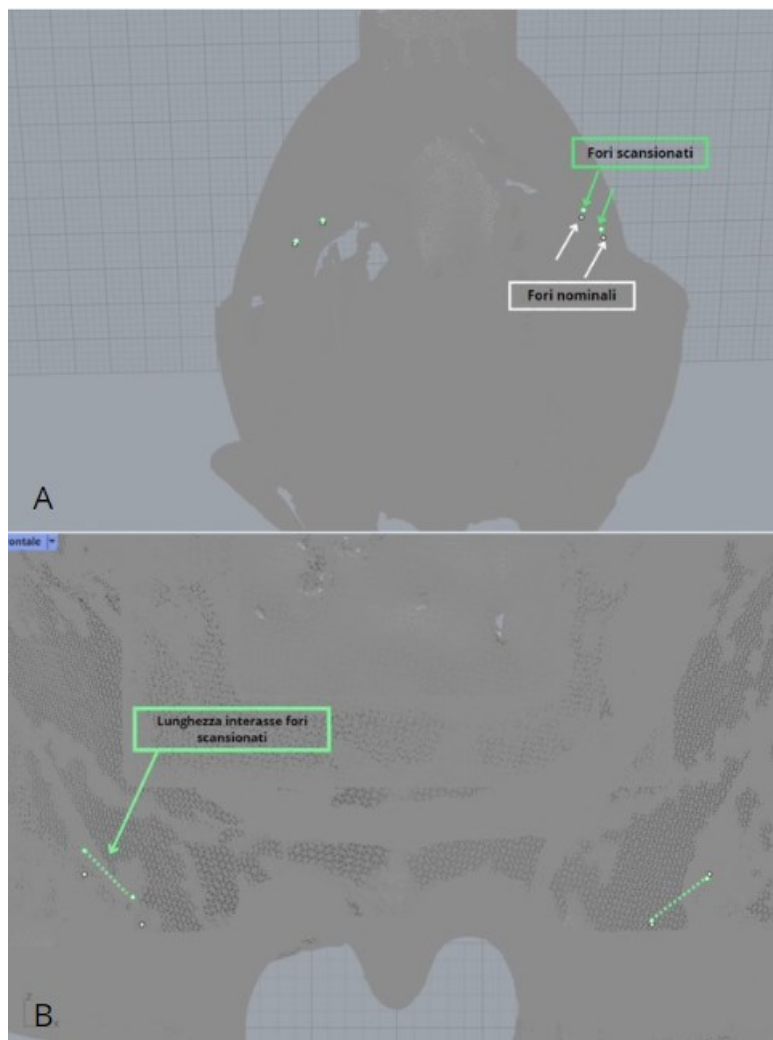


Figura 34 Fori mascellari: A) Visualizzazione fori scansionati (verde) e fori nominali (bianco); B) Visualizzazione interasse fori scansionati (verde)

3.4.6 Applicazione di una rototraslazione rigida per l'allineamento delle curve reali alle curve nominali

Come ultima considerazione di questo approccio, si presenta un'ulteriore verifica dello scostamento tra la geometria nominale delle curve e quella acquisita, con l'obiettivo di ottimizzare l'allineamento e ridurre l'errore medio. Il software Blender ha permesso di studiare le curve acquisite in blocco rispetto alla curva di riferimento.

Inizialmente, è stata eseguita una valutazione visiva delle curve per identificare eventuali disallineamenti significativi rispetto alla geometria nominale, permettendo di individuare i casi in cui la curva reale prese risulta essere molto distante da quella nominale.

Successivamente, è stata applicata una rototraslazione per centrare le curve acquisite in modo da minimizzare l'errore medio tra la geometria nominale e quella acquisita. In particolare, è stato individuato un valore di off-set che ha permesso di allineare in maniera più precisa le curve, riducendo l'errore complessivo sotto al millimetro. Quest'analisi è stata poi ripetuta per determinare con precisione l'entità degli scostamenti.

3.5 Parametri calcolati

I parametri scelti, per quantificare l'errore, l'entità degli scostamenti sono stati la media e la deviazione standard.

Si definisce media come indice di tendenza centrale ed è data dalla somma dei valori della variabile (x_i) diviso il numero delle osservazioni (N), come riportato nell'Equazione 1:

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Equazione 1 Media

In questo studio, si calcola la media dei valori delle distanze misurate, in modo tale da poter stimare l'errore medio che il visore può commettere nella rappresentazione degli ologrammi.

Considerazioni analoghe valgono per la deviazione standard, definita come indice di dispersione la cui formula è riportata nell' Equazione 2: [29]

$$SD_c = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X)^2}{N - 1}}$$

Equazione 2 Deviazione Standard

4. Risultati e discussione

Questo capitolo presenta i risultati ottenuti mediante l'applicazione del metodo, organizzati in tabelle.

Viene riportato l'errore medio riscontrato nelle verifiche relative alle curve e ai fori mascellari, mentre i risultati specifici per ciascun utente sono riportati nell'Appendice.

Non sono stati inclusi i risultati numerici relativi alla verifica dell'allineamento delle mesh e della congruenza delle curve reali sulle superfici nominali, poiché rappresentano passaggi intermedi volti a garantire una maggiore robustezza ai risultati successivi. Tuttavia, gli errori riscontrati in queste fasi intermedie risultano comunque ottimi, essendo inferiori al millimetro per ogni utente e per ciascun visore.

I risultati inerenti alle verifiche sulle curve della mandibola utilizzando i due visori Hololens 2 (HL) e Varjo XR-3 (VA) sono di seguito presentati nella Tabella 1. Vengono riportati gli errori medi riscontrati nelle verifiche di allineamento delle relative curve nella casistica "Genioplastica", "Ortognatica" e "Angolo"; gli errori medi nella verifica della simmetria ottenuti confrontano le curve specchiate scansionate con le curve nominali, nella casistica "Ortognatica Specchiata" e "Angolo Specchiato"; gli errori medi ottenuti nella verifica della simmetria ottenuta mediante il confronto tra le curve scansionate nella casistica "Ortognatica Simmetria" e "Angolo Simmetria".

	Genioplastica		Ortognatica		Ortognatica Specchiata		Ortognatica Simmetria		Angolo		Angolo Specchiato		Angolo Simmetria	
	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA
Media [mm]	0,82	0,80	0,66	0,93	0,41	0,34	0,64	0,62	0,84	1,36	0,66	1,11	0,89	0,81

Tabella 1 Mascella, Errori medi HoloLens e Varjo

Analogamente, i risultati relativi la mascella ottenuti dai due visori, sono presentati nella Tabella 2. In questo caso, vengono indicati come “Mascella” i risultati della verifica di allineamento tra curva della mascella scansionata e nominale; come “Mascella Specchiata” i risultati della verifica della simmetria ottenuti confrontando la curva specchiata scansionata con curva nominale; come “Mascella Fix” gli errori medi ottenuti mediante l’applicazione della rototraslazione rigida per l’allineamento delle curve scansionate; come “Mascella Simmetria” gli errori medi ottenuti mediante la verifica della simmetria delle curve reali in condizioni di test; come “Mascella Fori” i risultati ottenuti mediante la verifica dell’allineamento tra fori scansionati e fori di riferimento; come “Mascella Fori – Distanza” i risultati ottenuti mediante il confronto della lunghezza degli interassi dei fori nominali e degli scansionati.

	Mascella		Mascella Specchiata		Mascella Fix		Mascella Simmetria		Mascella Fori		Mascella Fori - Distanza	
	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA
Media [mm]	0,79	1,04	0,46	0,73	0,69	0,91	0,89	0,69	0,67	1,29	0,35	0,25

Tabella 2 Mandibola, Errori medi HoloLens e Varjo

Si evince da questi risultati che, per entrambi i visori, lo scostamento tra le geometrie nominali e reali è relativamente basso poiché generalmente inferiore al millimetro. In particolare, il visore HoloLens 2 mostra una maggiore precisione, con errore medio generale di 0,74 mm nella mandibola e di 0,64 mm nella mascella. Il Varjo XR-3, sebbene presenti valori simili, risulta meno preciso nelle condizioni di test, con un errore medio generale di 0,85 mm per la mandibola e 0,81 mm per la mascella.

Dati di particolare interesse sono i risultati derivati dalla misura della lunghezza dell’interasse dei fori mascellari. I risultati confermano che entrambi i visori sono effettivamente in grado di proiettare

con accuratezza i fori alla giusta distanza, con il Varjo XR-3 che mostra una maggiore precisione, pur presentando discrepanze nella loro posizione rispetto ai riferimenti nominali.

Per contestualizzare i risultati ottenuti e stimare il margine di miglioramento teorico, si fa riferimento alla Tabella 3 e alla Tabella 4. La prima riporta gli errori iniziali di partenza, ossia quelli ottenuti mediante l'allineamento delle curve e dei fori scansionati con i relativi di riferimento; la seconda mostra i risultati ottenuti migliorando la qualità dell'ologramma attraverso l'approccio best-fit del paragrafo 3.4.3.2 e del paragrafo 3.4.4.

	Mandibola - Genioplastica		Mandibola - Ortognatica		Angolo mandibolare		Curva mascella		Mascella Fori	
	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA
Media [mm]	0,82	0,80	0,66	0,93	0,84	1,36	0,79	1,04	0,67	1,29

Tabella 3 Mascella e Mandibola, Errori di partenza HoloLens e Varjo

	Mandibola - Genioplastica		Mandibola - Ortognatica		Angolo Mandibolare		Curva Mascella		Mascella- Distanza Fori	
	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA	HL	VA
Media [mm]	0,21	0,27	0,20	0,23	0,32	0,29	0,38	0,36	0,35	0,25

Tabella 4 Mandibola e Mascella, Qualità ologramma curve e fori, HoloLens e Varjo

Si osserva una riduzione dell'errore di circa tre volte, dimostrando il potenziale di ottimizzazione del sistema.

Un risultato particolarmente significativo consiste nella verifica della simmetria. In particolare, il caso denominato "Simmetria" della Tabella 1 e della Tabella 2 offre un confronto diretto con i dati relativi alla qualità dell'ologramma della Tabella 4. Questa analisi consente di valutare la simmetria tra le due curve in due scenari distinti: con la presenza di un off-set sistematico e in assenza.

Nel primo caso, l'off-set rappresenta un elemento di disturbo, ottenuto da condizioni non ideali che possono influenzare la precisione del sistema. Nel secondo caso, invece, viene presentato l'errore ai cui si potrebbe aspirare nel caso in cui si operi in condizioni ottimali, magari utilizzando un sistema di riferimento stabile e robusto, insensibile a eventuali spostamenti o distorsioni. Dunque, questi risultati consentono di determinare il margine di miglioramento teorico del sistema e la qualità dell'ologramma.

5. Conclusione

La realtà mista rappresenta una soluzione tecnologica promettente per la chirurgia maxillofacciale, come dimostrato dai risultati ottenuti utilizzando i visori Microsoft HoloLens 2 e Varjo XR-3. Lo studio ha evidenziato che l'integrazione di ologrammi virtuali con modelli fisici può migliorare la precisione delle procedure chirurgiche, riducendo il margine di errore. I risultati riportati nella Tabella 3, sono incoraggianti, poiché gli errori nell'esecuzione delle linee di taglio e dei fori ossei, sono generalmente inferiori al millimetro. Tuttavia, questi dati rappresentano un punto di partenza per un'ulteriore ottimizzazione della tecnologia, con l'obiettivo di raggiungere margini di errore ancora più contenuti, come quelli riportati nella Tabella 4.

Pertanto, questi aspetti richiedono ulteriori approfondimenti nella pratica, al fine di ottimizzare l'affidabilità della tecnologia e ridurre le discrepanze sistematiche.

Nello studio di questa tesi, si è cercato di individuare dei possibili approcci per avvicinarsi ai valori riportati in condizioni ottimali. Si è ipotizzato che gli errori riscontrati siano dovuti alla sensibilità del marker alle rotazioni; dunque, si è proposto un sistema multi-marker che vada a rendere robusto il sistema di riferimento. In quanto, se venisse identificata l'orientazione del marker da marker multipli il problema dell'orientamento può essere ridotto come posizionamento multiplo di oggetti, in quanto l'orientazione della rotazione è data dall'orientazione reciproca dei due marker.

L'analisi condotta in questa tesi non solo conferma il potenziale della realtà mista nel supportare la pianificazione e l'esecuzione chirurgica, ma fornisce anche una solida base per ulteriori ricerche volte a integrare questa tecnologia nei flussi operativi standard.

6. Appendice

	Genioplastica		Ortognatica		Ortognatica Specchiata		Ortognatica Simmetria	
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Utente 1	1,14	0,25	0,79	0,34	0,43	0,33	0,30	0,25
Utente 2	1,12	0,25	0,44	0,27	0,02	0,11	0,16	0,06
Utente 3	0,61	0,34	1,02	0,29	0,62	0,18	0,28	0,13
Utente 4	0,96	0,67	0,32	0,16	0,06	0,16	0,27	0,18
Utente 5	0,82	0,43	0,55	0,45	0,12	0,32	0,63	0,36
Utente 6	1,18	0,53	1,23	0,91	1,85	0,46	2,56	0,57
Utente 7	0,32	0,19	0,67	0,32	0,40	0,35	0,60	0,26
Utente 8	0,72	0,31	0,43	0,39	0,06	0,38	0,45	0,23
Utente 9	0,53	0,31	0,48	0,37	0,11	0,08	0,49	0,41
Media totale	0,82		0,66		0,41		0,64	

Tabella 5 Mandibola, Analisi curva Ortognatica e Genioplastica, HoloLens

	Angolo Mandibolare		Angolo Mandibolare - Specchiato		Angolo Mandibolare - Simmetria	
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Utente 1	0,64	0,31	0,28	0,30	0,48	0,28
Utente 2	0,76	0,75	1,08	0,83	1,35	0,96
Utente 3	0,59	0,30	0,40	0,39	0,95	0,45
Utente 4	0,51	0,18	0,21	0,20	0,40	0,23
Utente 5	0,85	0,49	0,39	0,32	1,23	0,27
Utente 6	0,78	0,46	0,85	0,38	1,30	0,65
Utente 7	1,57	0,71	1,17	0,43	0,90	0,71
Utente 8	1,17	0,51	0,86	0,49	0,43	0,33

Utente 9	0,66	0,31	0,67	0,15	0,97	0,34
Media totale	0,84		0,66		0,89	

Tabella 6 Mandibola, Analisi curve angolo mandibolare, HoloLens

	Genioplastica		Ortognatica		Angolo Mandibolare		Curva Mascella	
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione Standard [mm]	Media [mm]	Deviazione Standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Utente 1	0,19	0,1	0,22	0,11	0,25	0,17	0,31	0,16
Utente 2	0,16	0,1	0,08	0,05	0,16	0,07	0,39	0,27
Utente 3	0,21	0,12	0,27	0,1	0,53	0,23	0,50	0,31
Utente 4	0,33	0,19	0,12	0,07	0,29	0,16	0,50	0,14
Utente 5	0,2	0,12	0,26	0,15	0,22	0,1	0,30	0,17
Utente 6	0,3	0,12	0,24	0,11	0,4	0,22	0,43	0,19
Utente 7	0,13	0,1	0,1	0,07	0,36	0,16	0,35	0,16
Utente 8	0,17	0,07	0,21	0,1	0,36	0,2	0,41	0,20
Utente 9	0,16	0,07	0,29	0,17	0,29	0,12	0,25	0,12
Media totale	0,21		0,20		0,32		0,38	

Tabella 7 Mandibola e mascella, qualità dell'ologramma delle curve best-fit, HoloLens

	Curva Mascella		Curva Mascella Specchiata		Curva Mascella Simmetria		Curva Mascella Fix		Dist. Fori
	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]
Utente 1	0,50	0,24	0,08	0,16	0,58	0,24	0,59	0,26	0,21

Utente 2	0,50	0,18	0,22	0,16	0,62	0,26	0,43	0,22	0,17
Utente 3	0,82	0,54	0,36	0,14	0,93	0,89	0,60	0,70	0,26
Utente 4	0,64	0,25	0,21	0,18	0,73	0,30	0,60	0,25	0,22
Utente 5	1,43	0,30	1,11	0,35	2,13	0,36	1,20	0,36	-
Utente 6	1,00	0,51	0,72	0,51	0,66	0,33	0,88	0,36	-
Utente 7	0,48	0,33	0,37	0,34	0,64	0,42	0,47	0,31	1,01
Utente 8	0,74	0,34	0,64	0,32	0,95	0,53	0,63	0,48	0,45
Utente 9	1,03	0,55	0,42	0,19	0,79	0,39	0,83	0,53	0,14
Media totale	0,79		0,46		0,89		0,69		0,35

Tabella 8 Mascella, errori medi delle curve e fori, HoloLens

	Genioplastica		Ortognatica		Ortognatica Specchiata		Ortognatica Simmetria	
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Utente 1	0,25	0,09	0,79	0,42	0,04	0,17	0,72	0,13
Utente 2	0,72	0,31	0,79	0,55	0,24	0,32	0,57	0,46
Utente 3	0,99	0,88	1,02	0,90	0,37	0,77	0,43	0,24
Utente 4	0,71	0,30	0,46	0,26	0,28	0,26	0,58	0,23
Utente 5	0,75	0,30	1,19	0,52	0,37	0,43	0,70	0,45

Utente 6	1,61	0,36	1,42	0,26	1,04	0,24	0,28	0,19
Utente 7	0,41	0,23	0,85	0,44	0,11	0,17	0,60	0,30
Utente 8	0,79	0,44	1,60	0,82	0,61	0,38	1,41	0,73
Utente 9	0,96	0,45	0,28	0,26	0,02	0,23	0,28	0,21
Media totale	0,80		0,93		0,34		0,62	

Tabella 9 Mandibola, errori medi per le curve di genioplastica e ortognatica, Varjo XR-3

	Angolo Mandibolare		Angolo Mandibolare Specchiato		Angolo Mandibolare Simmetria	
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Utente 1	1,24	0,42	0,66	0,23	0,70	0,53
Utente 2	0,95	0,51	1,01	0,31	1,20	0,35
Utente 3	1,32	0,52	1,05	0,24	0,72	0,33
Utente 4	1,00	0,17	0,72	0,15	0,20	0,10
Utente 5	2,83	0,83	2,50	1,97	1,05	0,50
Utente 6	0,89	0,35	0,43	0,24	0,54	0,36
Utente 7	1,28	0,39	0,86	0,39	0,63	0,41
Utente 8	1,67	0,96	1,69	0,80	1,58	0,68
Utente 9	1,04	0,46	1,05	0,40	0,71	0,19
Media totale	1,36		1,11		0,81	

Tabella 10 Mandibola, errori medi angolo mandibolare, Varjo XR-3

	Curva Mascella		Curva Mascella Specchiata		Curva Mascella Simmetria		Curva mascella Fix		Dist. Fori
	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]	Dev. Std. [mm]	Media [mm]
Utente 1	0,93	0,45	0,70	0,38	0,57	0,28	0,62	0,25	0,06
Utente 2	0,37	0,18	0,04	0,18	0,33	0,20	0,87	0,26	0,00
Utente 3	0,70	0,52	0,53	0,61	0,77	0,25	0,99	0,45	0,20
Utente 4	0,78	0,39	0,47	0,36	0,66	0,50	0,55	0,25	0,49

Utente 5	2,20	1,18	1,88	1,41	1,13	0,62	2,45	1,37	0,40
Utente 6	1,05	0,57	0,51	0,32	0,73	0,49	0,72	0,43	-
Utente 7	1,20	0,32	0,68	0,33	0,60	0,23	0,58	0,38	0,33
Utente 8	0,93	0,48	0,98	0,48	0,89	0,55	0,82	0,42	0,35
Utente 9	1,18	0,47	0,78	0,31	0,52	0,25	0,63	0,3	0,20
Media totale	1,04		0,73		0,69		0,91		0,25

Tabella 11 Mascella, errori medi curve e fori, Varjo XR-3

	Genioplastica		Ortognatica		Angolo Mandibolare		Curva Mascella	
	Media [mm]	Deviazione standard [mm]	Media [mm]	Deviazione Standard [mm]	Media [mm]	Deviazione Standard [mm]	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Utente 1	0,12	0,09	0,18	0,09	0,27	0,13	0,37	0,12
Utente 2	0,13	0,08	0,08	0,03	0,34	0,38	0,19	0,10
Utente 3	0,47	0,2	0,32	0,15	0,21	0,23	0,28	0,10
Utente 4	0,23	0,12	0,16	0,12	0,13	0,07	0,36	0,15
Utente 5	0,25	0,13	0,30	0,16	0,21	0,12	0,75	0,20
Utente 6	0,22	0,14	0,24	0,13	0,39	0,24	0,37	0,19
Utente 7	0,23	0,12	0,17	0,13	0,36	0,23	0,27	0,23
Utente 8	0,41	0,14	0,4	0,23	0,46	0,14	0,38	0,22
Utente 9	0,34	0,19	0,18	0,09	0,23	0,11	0,30	0,10
Media totale	0,27		0,23		0,29		0,36	

Tabella 12 Mandibola e mascella, qualità ologramma delle curve e dei fori best-fit, Varjo XR-3

7. Bibliografia

- [1]. Dichiarata Martina, Development of a Mixed Reality Application for Maxillofacial Surgery for Varjo XR3 to be compared with HoloLens2.
- [2]. Danielli Andrea, Design and Development of an Augmented Reality Application deployed in Microsoft HoloLens V2 for Maxillary and Mandibular Osteotomy and Repositioning
- [3]. https://www.baoms.org.uk/patients/what_is_oral_maxillofacial_surgery.aspx
- [4]. Khechoyan DY. Orthognathic surgery: general considerations. Semin Plast Surg. 2013 Aug;27(3):133-6. doi: 10.1055/s-0033-1357109. PMID: 24872758; PMCID: PMC3805731.
- [5]. Viti C. PATOLOGIA ODONTOIATRICA D'INTERESSE ORL
- [6]. <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/tmj/symptoms-causes/syc-20350941>
- [7]. Dimitroulis G. Management of temporomandibular joint disorders: A surgeon's perspective. Aust Dent J. 2018 Mar;63 Suppl 1:S79-S90. doi: 10.1111/adj.12593. PMID: 29574810.
- [8]. Gupta R, Gupta N, Weber, DDS KK. Dental Implants. 2023 Aug 8. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan-. PMID: 29262027.
- [9]. Tagliareni JM, Clarkson E. Basic concepts and techniques of dental implants. Dent Clin North Am. 2015 Apr;59(2):255-64. doi: 10.1016/j.cden.2014.10.005. PMID: 25835792.
- [10]. <https://aaoms.org/education-meetings/academics/become-an-oms/oms-procedures/>
- [11]. <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/facial-trauma>
- [12]. H. Kashani and L. Rasmusson, 'Osteotomies in Orthognathic Surgery,' A Textbook of Advanced Oral and Maxillofacial Surgery Volume 3. InTech, Aug. 31, 2016. doi: 10.5772/63345.
- [13]. Rokhsaritalemi, Somaieeh, Abolghasem Sadeghi-Niaraki, and Soo-Mi Choi. 2020. "A Review on Mixed Reality: Current Trends, Challenges and Prospects" *Applied Sciences* 10, no. 2: 636. <https://doi.org/10.3390/app10020636>
- [14]. [14] Park BJ, Hunt SJ, Martin C 3rd, Nadolski GJ, Wood BJ, Gade TP. Augmented and Mixed Reality: Technologies for Enhancing the Future of IR. J Vasc Interv Radiol. 2020 Jul;31(7):1074-1082. doi: 10.1016/j.jvir.2019.09.020. Epub 2020 Feb 13. PMID: 32061520; PMCID: PMC7311237.
- [15]. <https://learn.microsoft.com/it-it/hololens/hololens-commercial-features#hololens-2-capabilities>
- [16]. <https://varjo.com/blog/twice-the-performance-half-the-price-%E2%80%AFsee-how-the-new-varjo-xr-3-and-vr-3-improve-from-earlier-varjo-headsets/>
- [17]. Chen, Long, et al. "Recent developments and future challenges in medical mixed reality." *2017 IEEE international symposium on mixed and augmented reality (ISMAR)*. IEEE, 2017.
- [18]. Sánchez-Margallo, J. A., Plaza de Miguel, C., Fernández Anzules, R. A., & Sánchez-Margallo, F. M. (2021). Application of Mixed Reality in Medical Training and Surgical Planning Focused on Minimally Invasive Surgery. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 692641. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.692641>

- [19]. Ham Y, Yang DS, Choi Y, Shin JH. Effectiveness of mixed reality-based rehabilitation on hands and fingers by individual finger-movement tracking in patients with stroke. *J Neuroeng Rehabil*. 2024 Aug 10;21(1):140. doi: 10.1186/s12984-024-01418-6. PMID: 39127667; PMCID: PMC11316335.
- [20]. Barteit S, Lanfermann L, Bärnighausen T, Neuhann F, Beiersmann C. Augmented, Mixed, and Virtual Reality-Based Head-Mounted Devices for Medical Education: Systematic Review. *JMIR Serious Games*. 2021 Jul 8;9(3):e29080. doi: 10.2196/29080. PMID: 34255668; PMCID: PMC8299342.
- [21]. Tang ZN, Hu LH, Soh HY, Yu Y, Zhang WB, Peng X. Accuracy of Mixed Reality Combined With Surgical Navigation Assisted Oral and Maxillofacial Tumor Resection. *Front Oncol*. 2022 Jan 14;11:715484. doi: 10.3389/fonc.2021.715484. PMID: 35096559; PMCID: PMC8795771.
- [22]. Ceccariglia F, Cercenelli L, Badiali G, Marcelli E, Tarsitano A. Application of Augmented Reality to Maxillary Resections: A Three-Dimensional Approach to Maxillofacial Oncologic Surgery. *J Pers Med*. 2022 Dec 12;12(12):2047. doi: 10.3390/jpm12122047. PMID: 36556268; PMCID: PMC9785494.
- [23]. Tang ZN, Hui Y, Hu LH, et al. [Application of mixed reality technique for the surgery of oral and maxillofacial tumors]. *Beijing da xue xue bao. Yi xue ban = Journal of Peking University. Health Sciences*. 2020 Dec;52(6):1124-1129. DOI: 10.19723/j.issn.1671-167x.2020.06.023. PMID: 33331325; PMCID: PMC7745289.
- [24]. <https://www.meshlab.net/>
- [25]. <https://www.rhino3d.com/it/>
- [26]. <https://www.cloudcompare.org/presentation.html>
- [27]. <https://paulbourke.net/dataformats/ply/>
- [28]. https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Main_Page
- [29]. Alessandro Mengarelli, Dispense del Corso di Metodi Statistici per la Bioingegneria,