ARTICOLO ORIGINALE

Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia
2024;50:142-151; doi: 10.32050/0390-0134-N684



La realtà mista nelle osteotomie di ginocchio con strumentario paziente specifico. Metaverso e chirurgia ortopedica: la nostra esperienza

Mixed reality in knee osteotomies with patient-specific instrumentation (PSI). Metaverse in orthopaedic surgery: our experience

Miriam Grassi[1] *(foto)*, Mariantonietta Scazzarriello[2], Andrea Mei[2], Davide Brioschi[1], Pietro Cerveri[3], Alfonso Manzotti[1]

[1] Ospedale Luigi Sacco, ASST Fatebenefratelli Sacco, Milano; [2] Facoltà di Medicina e Chirurgia, Scuola di specializzazione in Ortopedia e Traumatologia, Università degli Studi di Milano; [3] Politecnico di Milano, Dipartimento di Bioingegneria, Milano

Riassunto

Introduzione. Recenti sviluppi nella realtà aumentata consentono di pianificare e navigare sistemi dedicati alla chirurgia ortopedica.

Materiali e metodi. Questo studio retrospettivo monocentrico esamina 26 interventi di osteotomia correttiva di ginocchio con strumentario paziente-specifico (PSI) eseguiti su 24 pazienti (14 maschi, 10 femmine) da 11 operatori con diversi gradi di esperienza (8 ortopedici, 3 specializzandi) dal 2017 al 2021. Dati anagrafici, clinici, *imaging* e *planning* chirurgico per il calcolo degli angoli di taglio paziente-specifici sono stati registrati in un database e caricati su un software specifico sviluppato per il *device Head Mounted Display* (HMD), un dispositivo *Mixed Reality* (MR). Tutti gli operatori hanno completato un corso di formazione per l'utilizzo del HMD tenuto da un ingegnere. L'analisi quantitativa ha indagato la capacità di svolgimento di comandi (avvio del *device*, accesso ai dati dei pazienti, *imaging*, *planning* personalizzato, ricostruzione 3D) e l'analisi qualitativa i tempi di fruizione del HMD da parte di tutti gli operatori al tempo 0 e dopo 7 giorni, insieme a relativi questionari.

Risultati. Tutti gli operatori sono stati in grado di svolgere tutti i comandi richiesti. I tempi di fruizione del *device* sono risultati più brevi alla seconda prova (media 13 secondi per consultare i dati clinici, 43 secondi per l'*imaging*) e sempre compatibili con la realtà dell'intervento chirurgico. Il 100% degli operatori sostiene l'efficacia della MR per il *training* chirurgico, e il 90% per la pianificazione.

Discussione. Pur avendo l'intervento di osteotomia correttiva di ginocchio con PSI un basso tasso di complicanze postoperatorie, la percentuale media di insoddisfazione del paziente è pari al 20-25%, con tasso di revisione chirurgica del 10-15%. Lo sviluppo di nuove tecnologie è volto ad aumentare la soddisfazione del paziente concentrandosi sulla customizzazione dell'intervento. La realtà virtuale permette di integrare i dati utili del paziente in un unico *device*, e di utilizzarli nel mondo fisico come ausilio al momento della chirurgia grazie alla MR.

Conclusioni. Anche se su un campione modesto, questo studio ha dimostrato la possibilità di applicare con successo la MR alle osteotomie correttive di ginocchio, con risparmio di tempo, facilità nell'accesso ai dati e nell'esecuzione della chirurgia stessa, grazie a un unico *device*. Ulteriori studi sono necessari per testare le applicazioni della realtà aumentata in ortopedia.

Parole chiave: metaverso, osteotomia di ginocchio, strumentario paziente specifico, realtà mista, device Head Mounted Display (HMD)

Ricevuto: 4 dicembre 2024
Accettato: 16 gennaio 2025

Corrispondenza
Miriam Grassi
E-mail: grassi.miriam@asst-fbf-sacco.it

Conflitto di interessi
Gli Autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interesse con l'argomento trattato nell'articolo.

Come citare questo articolo: Grassi M, Scazzarriello M, Mei A, et al. La realtà mista nelle osteotomie di ginocchio con strumentario paziente specifico. Metaverso e chirurgia ortopedica: la nostra esperienza. Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia 2024;50:142-151; https://doi.org/10.32050/0390-0134-N684

© Copyright by Pacini Editore Srl

OPEN ACCESS

L'articolo è OPEN ACCESS e divulgato sulla base della licenza CC-BY-NC-ND (Creative Commons Attribuzione – Non commerciale – Non opere derivate 4.0 Internazionale). L'articolo può essere usato indicando la menzione di paternità adeguata e la licenza; solo a scopi non commerciali; solo in originale. Per ulteriori informazioni: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it

Summary

Introduction. *Recent advances in Augmented Reality have enabled the planning and navigation of systems dedicated to orthopedic surgery.*

Materials and methods. *This single-center retrospective study examines 26 corrective knee osteotomies using Patient-Specific Instrumentation (PSI) performed on 24 patients (14 males, 10 females) by 11 operators with various expertise levels (8 orthopedic surgeons, 3 residents) from 2017 to 2021. Data regarding patients demographics, clinical informations, imaging, and surgical planning for calculating patient-specific cutting angles were recorded in a database and uploaded to specialized software developed for a Head Mounted Display (HMD) device, a Mixed Reality (MR) tool. All operators completed a training course on the use of the HMD conducted by an engineer. Quantitative analysis assessed the operators' ability to execute commands (device startup, access to patient data, imaging, customized planning, 3D reconstruction), while qualitative analysis evaluated the time required for HMD utilization by all operators at time 0 and after 7 days, along with related questionnaires.*

Results. *All operators were able to execute all the required commands. The time required to use the device was shorter during the second attempt (an average of 13 seconds to consult clinical data and 43 seconds for imaging), and consistently compatible with the realities of surgical procedures. 100% of the operators supported the effectiveness of MR for surgical training, and 90% endorsed it for surgical planning.*

Discussion. *Although corrective knee osteotomy using PSI has a low rate of postoperative complications, the average patient dissatisfaction rate is 20-25%, with a 10-15% surgical revision rate. The development of new technologies aims to increase patient satisfaction by focusing on the customization of surgical procedures. Virtual Reality allows the integration of useful patient data into a single device, enabling its use in the physical world as an aid during surgery through MR.*

Conclusions. *Although based on a modest sample, this study demonstrated the successful application of MR to corrective knee osteotomies, resulting in time savings, ease of data access, and improved surgical execution through a single device. Further studies are needed to explore the applications of Augmented Reality in orthopedics.*

Key words: *metaverse, knee osteotomy, Patient-Specific Instrumentation (PSI), Mixed Reality, device Head Mounted Display (HMD)*

Introduzione

Il metaverso è uno spazio virtuale immersivo in cui gli utenti hanno la possibilità di eseguire diverse attività in tempo reale e in simultanea attraverso le loro rappresentazioni virtuali (avatar) [1], interagendo tra loro e con gli ambienti digitali. Una modalità di accesso al Metaverso è tramite realtà estesa.

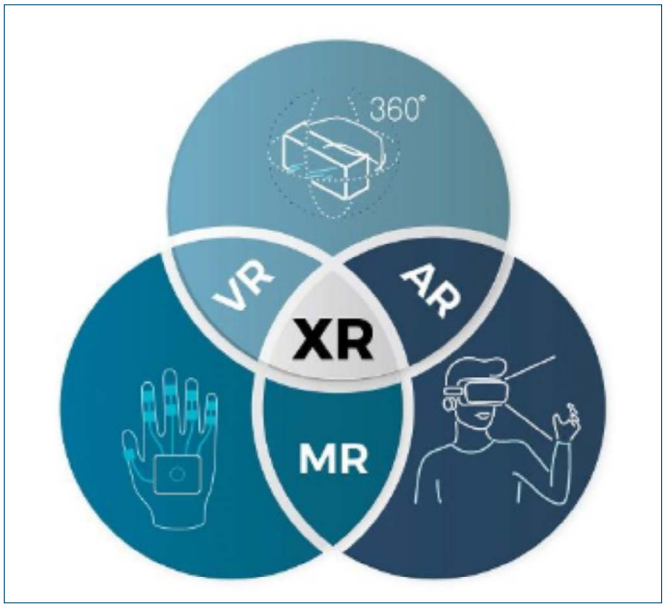


Figura 1. La realtà estesa e i suoi ambiti di applicazione immersiva.

Il termine realtà estesa (*Extended Reality*, XR) si riferisce alle tecnologie immersive che riflettono o riproducono la realtà fisica combinandola con la sua "gemella virtuale" [2], rendendo possibili diversi tipi di interazione tra le due. Ne sono esempi la realtà virtuale (*Virtual Reality*, VR), la realtà aumentata (*Augumented Reality*, AR) e la realtà mista (*Mixed Reality*, MR). La VR consente un'esperienza interamente immersiva in un mondo artificiale creato digitalmente, per mezzo di dispositivi *head-mounted* e supporti audio e tattili. La AR sovrappone o arricchisce la realtà fisica con contenuti virtuali, accessibili tramite dispositivi quali occhiali, schermi, tablet, smartphone; viene quindi mantenuta una certa autenticità della realtà fisica. La MR è una forma più avanzata di AR in cui il mondo fisico e virtuale coesistono e interagiscono tra loro [3] (Fig. 1). Una modalità di fruizione della realtà mista è l'*Optical See Through* (OST), con cui il contenuto digitale viene proiettato su una lente attraverso la quale l'utente può vedere anche la realtà fisica in cui si trova. Un esempio è il dispositivo *Head-Mounted* (HMD) Microsoft HoloLens [4].

L'applicazione del Metaverso ad un contesto ortopedico è un approccio di recente introduzione con numerosi vantaggi per il chirurgo, quali la possibilità di interazioni multidisciplinari, la possibilità di migliorare il *training* chirurgico, riducendo la *learning* curve di apprendimento, così come la pianificazione preoperatoria, aumentando di concerto la sicurezza per il paziente e per l'operatore. Questo studio nasce dalla collaborazione tra il Dipartimento di Bioinge-

gneria del Politecnico di Milano e la nostra Unità Operativa.
La correzione delle deformità ossee del ginocchio tramite osteotomia rappresenta una tecnica relativamente conservativa, che ha come obiettivo il risparmio articolare, attraverso la correzione delle deformità con il ripristino della funzionalità articolare, senza ricorrere ad impianti protesici. Si tratta di una tecnica chirurgica di nicchia, che è stata selezionata nel Nostro Studio per via della difficoltà obiettiva a maturare una certa expertise nell'ambito della chirurgia del ginocchio e ad ottenere ampie casistiche con follow-up adeguati.
Attualmente le nuove tecniche computerizzate consentono di standardizzare il gesto chirurgico, rendendolo riproducibile ed uguale a se stessso, riducendo quindi la *learning curve*, ottimizzando i risultati e le tempistiche della pratica chirurgica.
L'obiettivo di questo studio è valutare l'applicabilità della tecnologia di MR all'intervento di osteotomia di ginocchio con strumentazione paziente-specifica (*Patient Specific Instrumentation*, PSI), in una coorte specifica di pazienti. In particolare, le finalità dello studio sono l'analisi dell'uniformità della possibilità di accesso al dispositivo da parte degli operatori, della facilità di fruizione del *device* e della rapidità nella fruizione dei contenuti caricati.
Lo studio è stato condotto in collaborazione col Dipartimento di Bioingegneria del Politecnico di Milano che ha messo a disposizione il dispositivo con tecnologia *MR Head-Mounted Display* (HMD) HoloLens 2 e ha sviluppato il sistema *Holoknee*, specifico per l'osteotomia di ginocchio (Fig. 2).
Tale sistema permette l'interazione con dati clinici dei pazienti, immagini di esami radiologici e di *planning* chirurgico precedentemente caricate in formato. pdf,. jpg e. dicom, oltre che la simulazione di azioni chirurgiche grazie a specifiche finestre olografiche [5]. Il *device* HMD viene indossato sulla testa dell'operatore ed è in grado di mostrare il contenuto digitale all'interno del campo visivo dell'utente, consentendo di interagire con la realtà aumentata attraverso l'utilizzo di tutto il corpo; nel caso in analisi, il dispositivo è navigabile attraverso comandi manuali (Fig. 3). Microsoft HoloLens 2 [6] è un dispositivo olografico presente dal 2019, successore del pionieristico Microsoft HoloLens; è ergonomico, leggero (566 g), regolabile, consente il tracciamento oculare e manuale di entrambe le mani. Risulta un dispositivo adatto e fruibile in diversi contesti, in modo da fornire al chirurgo la possibilità di accedere ad un aumentato numero di informazioni in maniera facile e dinamica.



Figura 2. Holoolens 2 Microsoft Corporation.

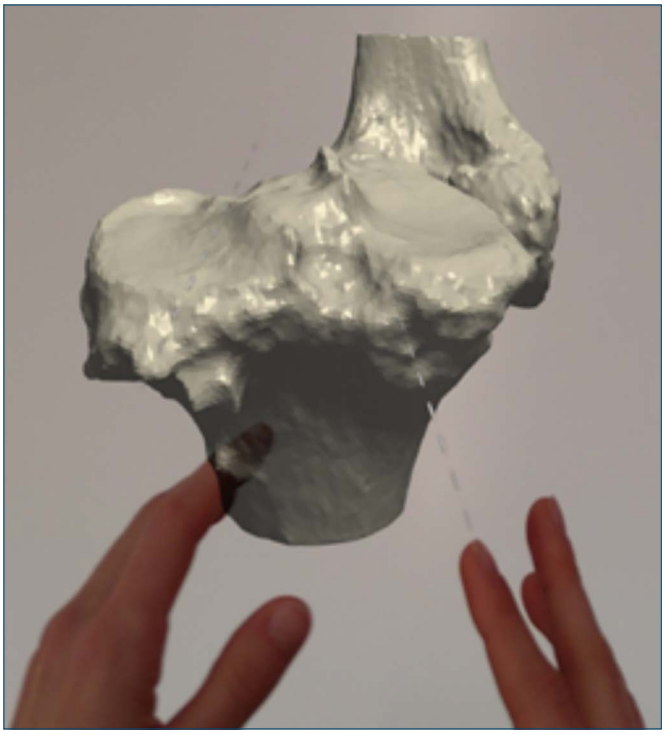


Figura 3. Pianificazione preoperatoria con modello 3D.

Materiali e metodi

È uno studio preclinico sperimentale, retrospettivo, monocentrico, condotto in collaborazione con il Dipartimento di Bioingegneria del Politecnico di Milano, che ha messo a disposizione il dispositivo con tecnologia HMD HoloLens 2 e ha sviluppato il sistema *Holoknee*, specifico per l'osteotomia di ginocchio.
La casistica presa in considerazione esamina 26 interventi di osteotomia di ginocchio con strumentario paziente specifico operati su 24 pazienti (2 sono stati operati bilateralmente).

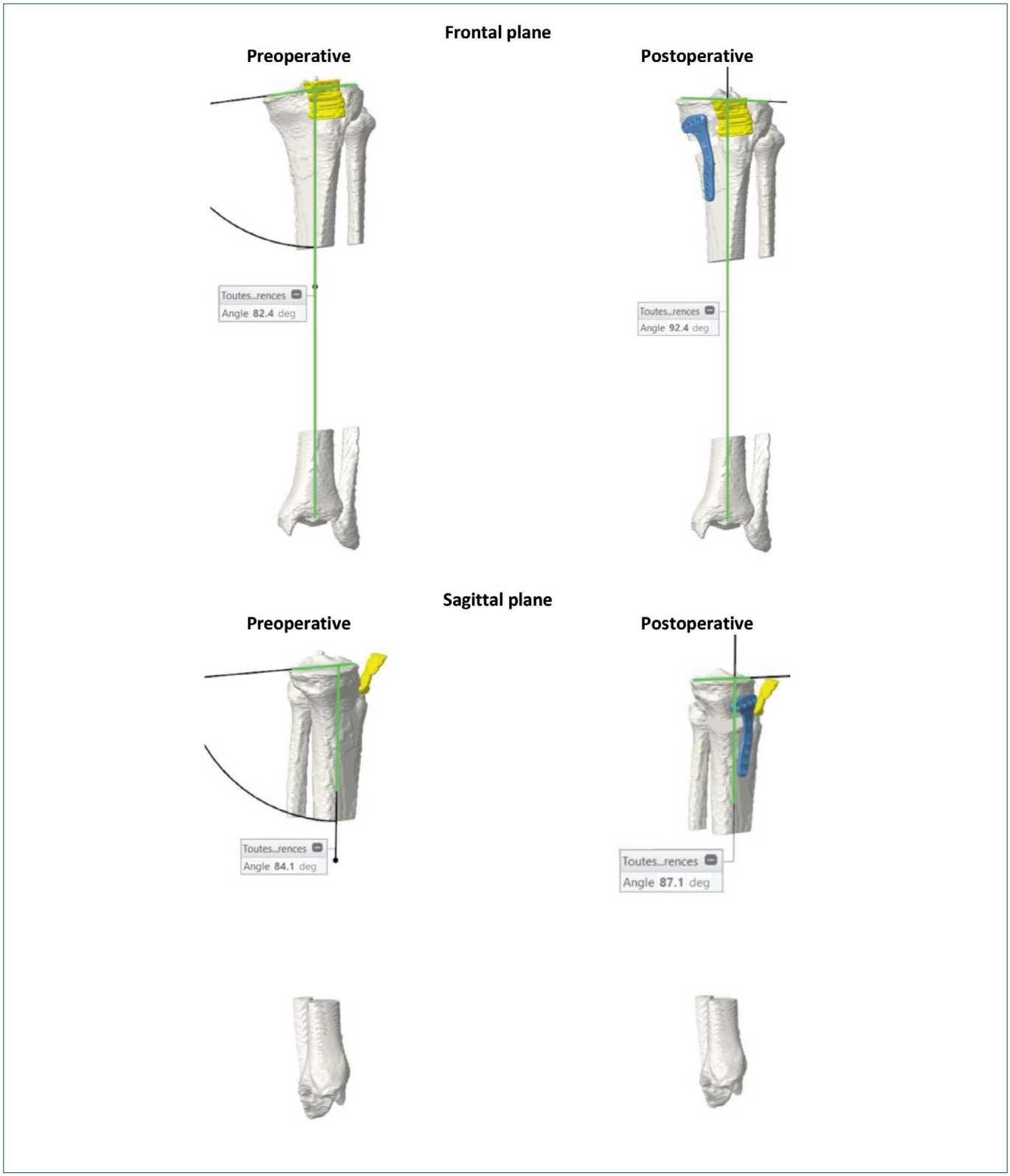


Figura 4. Pianificazione preoperatoria con calcolo della correzione della deformità sul piano frontale e sagittale.



Figura 5. Schermata del Sistema HoloKnee utilizzata per questo studio con la collaborazione del Politecnico di Milano

Tabella I. Comandi prestabiliti eseguiti dai partecipanti.

Compito		Comando
Avvio dell'applicazione sull'HMD	AC	Visualizzazione della schermata iniziale
Dati anagrafici e clinici dei pazienti	IN	Lettura delle iniziali di nome e cognome; Lettura BMI
Pianificazione operatoria	PL	Lettura lunghezza della vite distale
Accesso all'*imaging*	CT	Apertura RX in AP e LL Caricamento immagini TC
Accesso al modello TC 3D	3D	Scorrimento dei tagli coronale, sagittale, assiale
Scorrimento di tutte le radiografie	XR	Spostamento della finestra olografica, pressione di un bottone

I pazienti, 14 maschi e 10 femmine, sono stati operati presso la nostra Unità Operativa tra il 2017 e il 2021. Su 26 interventi totali, 6 sono stati di correzione di valgismo acquisito e 20 di correzione di varismo acquisito.
Pur essendo lo strumentario paziente-specifico realizzato su misura per ogni paziente, il processo di pianificazione è standardizzato, cioè richiede sempre la stessa modalità di studio e di analisi del paziente.
Per tutti i pazienti selezionati è stata eseguita la medesima pianificazione preoperatoria, con esecuzione di:

a. RX bilaterale in carico degli arti inferiori nelle proiezioni antero-posteriore e laterale;
b. TAC ad alta definizione bilaterale delle ginocchia.

Questi esami sono indispensabili per calcolare gli assi di allineamento degli arti inferiori e le linee di orientamento articolare, tra cui *Hip Knee Ankle angle* (HKA angle), *Lateral Distal Femural Angle* (LDFA), *Medial Proximal Tibial Angle* (MPTA), *Joint Line Convergence Angle* (JLCA), MAD (distanza asse meccanico – centro di rotazione articolare), e le eventuali deformità angolari sui piani frontale e sagittale consentendo quindi di calcolarne la correzione (Fig. 4).
Tramite programmi per la ricostruzione 3D a partire dalle immagini RX e TC, propri dell'azienda produttrice delle placche di correzione, l'equipe di ingegneri ha calcolato gli angoli di taglio dell'osteotomia specifici per ogni paziente ed ha pianificato la produzione delle mascherine di taglio personalizzate, stampate in 3D, e le placche di correzione del valgismo o varismo del ginocchio. I chirurghi ortopedici partecipanti allo studio hanno successivamente approvato la pianificazione o apportato eventuali modifiche necessarie.
I criteri di inclusione dei pazienti nello studio comprendono la presenza del planning preoperatorio, i dati anagrafici e clinici (età, sesso, BMI, terapie antiaggreganti e anticoagu-

lanti, diagnosi ortopedica), esami *imaging* sopracitati. Tutti questi dati sono stati caricati sul *device* HMD HoloLens 2. La mancanza, totale o parziale, di tali dati rappresenta criterio di esclusione.

Gli operatori coinvolti sono chirurghi ortopedici esperti e specializzandi in Ortopedia, appartenenti all'equipe dell'UO Ortopedia e Traumatologia dell'ASST FBF SACCO Ospedale Luigi Sacco di Milano. Tutti gli operatori hanno seguito un corso di formazione di 20 minuti relativo alla fruizione del *device*, con successive prove pratiche e raccolta di dati quantitativi e qualitativi a esse relativi. Il corso è stato organizzato dall'ingegnere sviluppatore del sistema, e si è articolato in due momenti: inizialmente presa di confidenza con il dispositivo attraverso la spiegazione di comandi e movimenti, successivamente dimostrazione pratica dei comandi da eseguire.

Le prove sono state svolte nel contesto di un laboratorio in cui gli operatori, a turno, indossando il dispositivo HMD hanno svolto simulazioni di un intervento chirurgico di osteotomia valgizzante o varizzante di tibia. È stata valutata, tramite l'esecuzione di comandi prestabiliti, la capacità di accedere al *device* (avvio dell'applicazione), ai dati anamnestici del paziente e alla cartella clinica, al planning operatorio personalizzato, agli esami RX e TAC, al modello 3D ottenuto dalle segmentazioni TAC e la capacità di scorrimento attraverso tutte le immagini radiografiche (Fig. 5, Tab. I) così da poter aiutare l'operatore nell'esecuzione dell'intervento. Sono inoltre stati misurati, in secondi, i tempi di fruizione del *device* cronometrando l'esecuzione dei comandi sopracitati. Tutte le valutazioni e misurazioni sono state eseguite in due prove al tempo 0 (prima sessione) e una terza prova a distanza di 7 giorni (seconda sessione), senza ulteriori sessioni nel mezzo. Per ogni paziente è stata calcolata la media aritmetica e successivamente la media finale come risultato delle singole. Si è considerata una differenza statisticamente significativa per $p < 0.05$.

Alla fine di ogni sessione è stato consegnato agli operatori un questionario relativo all'esperienza svolta nelle diverse fasi (*training*, pianificazione preoperatoria, fase intraoperatoria) e alla fruibilità del sistema, con domande chiuse a risposta multipla selezionabile nella scala tra "fortemente in disaccordo" e "fortemente d'accordo". Nello specifico,

Tabella II. Questionario *Health Technology Assessment* del sistema.

Fase	Dominio	Domanda/affermazione	Risposte	n.
Training	Efficacia	La MR è efficace per il *training* chirurgico	FA	11
	Sicurezza	Preoccupazione relativa all'uso del HMD in fase di *training*	Problemi tecnici	8
			Sintomi avversi (nausea, cefalea)	1
	Impatto organizzativo	È necessario molto tempo per imparare l'uso corretto del HMD	FA	1
			A	1
			D	6
			FD	1
			N	2
Pianificazione preoperatoria	Efficacia	La MR è efficace in fase preoperatoria	FA	10
			A	1
		Il sistema fornisce una migliore percezione dell'anatomia	FA	9
			A	1
			N	1
	Sicurezza	Preoccupazione relativa all'uso del HMD in fase preoperatoria	Problemi tecnici	8
			Carenza di informazioni attendibili sulla tecnologia	3
	Impatto organizzativo	È già semplice avere accesso ai dati del paziente durante l'intervento	A	1
			D	4
			FD	4
			N	2

Tabella II. Continua dalla pagina precedente.

Fase	Dominio	Domanda/affermazione	Risposte	n.
Fase intraoperatoria	Efficacia	La MR è efficace in fase intraoperatoria	FA	2
			A	6
			D	1
			N	2
		Il sistema può migliorare i tempi operatori	FA	2
			A	3
			D	2
			N	4
		Il sistema può aumentare la precisione chirurgica	FA	5
			A	5
			N	1
	Sicurezza	L'uso del sistema può inficiare l'attenzione del chirurgo	A	4
			D	5
			FD	2
		L'uso del sistema può aumentare il carico cognitivo del chirurgo	FA	2
			A	5
			D	2
			FD	1
			N	1
		Preoccupazione relativa all'uso del HMD in fase intraoperatoria	Problemi tecnici	9
	Impatto organizzativo	Il sistema può migliorare la comunicazione nel team chirurgico	A	5
			N	6
		È necessario molto tempo per implementare l'uso del dispositivo in sala operatoria	A	2
			D	5
			FD	1
			N	3

MR (Mixed Reality). HMD (Head Mounted Display). FA (fortemente d'accordo). A (d'accordo). D (disaccordo). FD (fortemente in disaccordo). N (neutro).

le domande vertevano sulla valutazione di efficacia, sicurezza e impatto organizzativo secondo il sistema proposto dall'HTA Core Model® dell'*European Network for Health Technology Assessment* (EUnetHTA) [7], ovvero un processo mutlidisciplinare per la determinazione standardizzata del valore di una nuova tecnologia applicabile in campo sanitario [8] (Tabb. II, III).

Risultati

Analisi quantitativa: tempi di fruizione del dispositivo (Tab. IV)

Tutti gli operatori sono stati in grado di eseguire tutti i comandi richiesti. Uno degli operatori non ha potuto partecipare alla seconda sessione.

Le medie complessive dei tempi registrati nella prima e

Tabella III. Questionario sulla fruibilità del sistema.

Domande	Risposte	n.
Il sistema può migliorare la comunicazione con i pazienti	FA	6
	A	3
	N	1
La presenza di uno specialist del sistema in sala operatoria può essere utile per eventuali problemi tecnici	FA	5
	A	5
Si ha maggiore confidenza con l'uso del dispositivo alla seconda simulazione?	Maggiore confidenza	8
In quale fase il sistema può migliorare le tempistiche?	Educazione del paziente	10
	Pianificazione preoperatoria	10

FA (fortemente d'accordo). A (d'accordo). D (disaccordo). FD (fortemente in disaccordo). N (neutro).

seconda prova della prima sessione sono rispettivamente 41.5 e 26.1 secondi, mentre nella terza prova di 31 secondi. Durante la seconda prova i partecipanti sono stati più rapidi in tutti i comandi, con una differenza statisticamente significativa in tutti eccetto che nella lettura dei dati anagrafici e clinici ($p = 0.13$) e nell'accesso al modello 3D ($p = 0.96$). Non si sono registrate differenze statisticamente significative tra la prima e la seconda sessione, nonostante i tempi di lettura dei dati anagrafici e clinici e dell'accesso al modello 3D siano risultati inferiori nella se-

Tabella IV. Tempi (in secondi) di esecuzione dei comandi.

	Prima sessione												Seconda sessione					
	Prima prova						Seconda prova						Terza prova					
	AC	IN	PL	CT	3D*	XR	AC	IN	PL	CT	3D*	XR	AC	IN	PL	CT	3D*	XR
OP. 1	40	20	41	120	80	30	20	15	15	30	60	25	50	11	29	73	40	10
OP. 2	30	11	60	60	25	39	12	10	10	20	42	20	22	10	40	50	39	11
OP. 3	40	15	50	70	37	20	20	25	22	58	30	15	33	12	31	46	30	15
OP. 4	31	19	50	60	45	30	2	10	10	45	20	18	16	11	24	56	27	7
OP. 5	60	23	58	60	60	12	33	16	52	55	30	10	24	8	80	60	30	14
OP. 6	44	18	80	80	30	15	30	15	55	50	24	12	22	17	40	71	37	20
OP. 7	80	13	55	90	40	30	15	13	40	50	30	18	25	10	15	60	32	4
OP. 8	60	16	45	90	15	11	45	10	30	50	13	10	26	12	52	57	60	10
OP. 9	31	7	50	60	30	15	60	9	25	40	28	15	32	10	55	76	36	12
OP. 10	39	9	26	16	29	8	25	7	28	11	45	7	-	-	-	-	-	-
OP. 11	48	22	72	93	58	7	34	13	16	66	26	7	28	10	25	48	35	6
MEDIA	45,7	15,7	54,3	72,6	40,8	19,7	26,9	13,0	27,5	43,2	31,6	14,3	28,8	11,1	39,1	59,7	36,6	10,9
DEV. STD.	15,4	5,3	12,9	26,8	18,8	10,8	16,1	4,9	15,7	16,7	12,9	5,7	8,3	2,4	19,1	10,6	9,2	4,7

AC = avvio dell'applicazione; IN = dati anagrafici e clinici dei pazienti; PL = pianificazione operatoria; CT = accesso all'imaging; 3D = accesso al modello TC 3D; XR = scorrimento di tutte le radiografie.
(*) visto il peso del file dal punto di vista informatico e del suo maggiore tempo di caricamento, su questo dato si è valutato uno scarto di 38 secondi valutati come tempistica di accesso uniforme per tutti gli operatori.

conda sessione, rispettivamente 14,3 e 36,2 secondi in media nella prima sessione verso 11.1 e 36.6 nella seconda. Per i dati relativi alla ricostruzione TAC 3D bisogna tenere conto di uno scarto di 38 secondi, calcolati in fase di progettazione come tempo di caricamento del file, e considerato uguale per tutti. I totali delle medie registrate sono 254.2, 161.6 e 186.2 secondi rispettivamente alla prima, seconda e terza prova, con una media complessiva di 200.7 secondi.

Valutazione qualitativa: questionari (Tabb. II, III)

Tutti i partecipanti sostengono l'efficacia della MR per il *training* chirurgico e per la pianificazione preoperatoria, mentre 6 per l'utilizzo intraoperatorio. Per molti partecipanti la preoccupazione principale in tutte le fasi (*training*, pianificazione preoperatoria, intraoperatoria) è correlata a problemi tecnici, quali connessione alla rete Internet o la durata della batteria del HMD. Sei partecipanti ritengono che sia necessario molto tempo per padroneggiare l'utilizzo di questa tecnologia. Il 90% degli ortopedici concorda sulla migliore percezione dell'anatomia del paziente grazie all'aiuto del sistema. Il 72,2% ritiene il sistema utile per semplificare l'accesso ai dati del paziente durante l'intervento chirurgico. Il 90% sostiene una maggiore precisione del gesto chirurgico grazie al dispositivo, e il 63,6% che il suo utilizzo non infici l'attenzione del chirurgo. Inoltre, il 60% concorda sulla possibile riduzione delle tempistiche operative utilizzando la MR, in particolare nei processi di educazione del paziente e della pianificazione preoperatoria. La presenza di uno specialist dedicato in sala operatoria per affrontare eventuali problemi tecnici è stata suggerita da tutti i partecipanti. Infine, l'80% degli ortopedici ha dichiarato maggiore confidenza nell'utilizzo del dispositivo durante la seconda sessione rispetto alla prima.

Discussione

L'applicazione del Metaverso in chirurgia ortopedica può portare a numerosi vantaggi dal punto di vista clinico e pratico. Il maggiore beneficio può essere tratto specialmente per interventi complessi, quali le osteotomie correttive, che necessitano di una pianificazione precisa e di una guida intraoperatoria [9]. Lo sviluppo di nuove tecnologie è quindi volto ad aumentare la soddisfazione del paziente in un'ottica di standardizzazione dell'intervento.

Il razionale di questo studio è utilizzare la tecnologia del Metaverso per analizzare le condizioni chirurgiche del paziente mediante un unico *device*, semplificando il gesto chirurgico, agevolando il percorso riabilitativo e riducendo il discomfort post-operatorio. L'integrazione dei dati utili relativi all'intervento chirurgico su un unico dispositivo di MR può renderne l'accesso e la fruibilità più semplici e rapidi per il chirurgo sia durante la fase di preparazione che durante la procedura chirurgica stessa. Tale dispositivo può trovare ampio utilizzo anche nell'attività clinica e didattica, implementando l'apprendimento di nuove capacità in minor tempo e maggiore coinvolgimento dell'utente. Inoltre potrebbe rappresentare uno strumento valido di confronto e di condivisione di casistiche non solo tra professionisti in fase di formazione ma anche tra chirurghi esperti.

Nello studio svolto da Rojo et al. sull'utilizzo della MR in contesti di apprendimento, il 93% degli studenti coinvolti ha raccomandato l'utilizzo dell'AR per il *training* chirurgico [10]. In contesti di pratica chirurgica l'utilizzo del Metaverso ha dimostrato di ridurre sia il carico cognitivo del chirurgo che l'esposizione alle radiazioni del fluoroscopio. È inoltre possibile aumentare la precisione nel riconoscimento delle strutture anatomiche e la sicurezza del gesto chirurgico tramite sovrapposizione di immagini digitali, da modelli o immagini radiologiche, al sito chirurgico [11].

Nel nostro caso specifico, il dispositivo HMD si è rivelato, rispetto ai supporti cartacei e digitali attualmente in uso, di semplice utilizzo da parte degli operatori e ha permesso loro una rapida fruizione dei contenuti caricati, sia come testo che come immagini, all'interno di un'unica cornice di lavoro virtuale. Visto il tasso di accessibilità alle funzioni del 100% in tutte le rilevazioni, si può dedurre che tutti gli operatori sono stati in grado da subito di eseguire tutti i comandi richiesti, con l'eccezione del singolo partecipante che non ha preso parte alla seconda sessione.

Per avere un'idea di confronto del tempo di accesso alle informazioni nel contesto dell'intervento chirurgico senza l'utilizzo del *device* HMD, si suppone una media di 15 minuti (dato derivante dall'esperienza degli autori), rispetto ai 200 secondi circa utilizzando HoloLens 2. Si sono inoltre registrate differenze nei tempi di avvio dell'applicazione sul *device* tra ortopedici e specializzandi con diverso grado di esperienza, dovuta verosimilmente a una ridotta manualità informatica da parte degli operatori meno giovani. Acquisire padronanza nell'utilizzo del dispositivo richiede una curva di apprendimento più o meno ripida. Le principali criticità incontrate sono state, inizialmente, nell'utilizzo dei fini movimenti manuali per la manipolazione olografica e nella capacità di orientamento in un nuovo spazio digitale. La grande variabilità osservata nelle tempistiche di esecuzione dei comandi (Tab. IV) potrebbe riflettere la variabilità intrinseca della coorte di partecipanti, con diverse fasce di età, cultura digitale, consapevolezza spaziale, capacità di adattamento a nuove tecnologie [5]. Dalle analisi dei dati emerge comunque la capacità generalizzata di fruizione del dispositivo di MR per ogni comando in tempi relativamente brevi e compatibili con la realtà dell'intervento, che si suppone durare 120 minuti circa. Non è da sottovalutare la possibilità di accesso ai dati in completa autonomia da parte del primo operatore. Nel contesto attuale, infatti, è richiesta la presenza di una figura esterna al campo ope-

ratorio per ottenere informazioni relative al paziente e alla pianificazione, come per visualizzare RX, TAC e modello 3D sul computer. I questionari evidenziano la potenziale utilità della MR in fase intraoperatoria in termini di riduzione dei tempi chirurgici e del carico cognitivo del team, oltre che all'aumento di precisione del gesto chirurgico. Tutti i partecipanti allo studio sono concordi nel riconoscere l'utilità e i vantaggi del dispositivo anche nella fase di *training*. In particolare i giovani ortopedici possono esercitarsi sulle procedure chirurgiche, incrementando le loro capacità e accuratezza. Inoltre, la possibilità di condivisione dello stesso scenario tra più operatori che indossano l'HMD renderebbe il *training* più interattivo ed efficace. L'introduzione di queste nuove tecnologie ha avuto un impatto positivo sul *training* in termini di ottimizzazione dei tempi operatori e di riduzione degli errori sui pazienti reali [12].
Questo studio presenta alcune limitazioni. Il disegno retrospettivo rende necessaria l'analisi di soli dati già disponibili; il numero modesto dei casi analizzati rende difficile ottenere una significatività statistica; manca, inoltre, una coorte di controllo con cui confrontare le modalità e i tempi di accesso ai dati nel contesto di non utilizzo del *device* HMD. Essendo uno studio condotto in fase preclinica, è necessario implementare l'utilizzo di questa tecnologia e testarne l'effettiva fruibilità in fase intraoperatoria e nella pratica clinica.

Conclusione

Nonostante i limiti, lo studio ha dimostrato la possibilità di applicare con successo la MR alle osteotomie correttive di ginocchio con guide paziente specifiche. Questa tecnologia consente di eseguire la pianificazione e l'intervento con notevole risparmio di tempo e facilità nell'accesso dei dati grazie a un unico dispositivo HMD. Rende, inoltre, la parte di *training* chirurgico maggiormente accessibile, con i relativi vantaggi in termini di aumentata precisione chirurgica e ottimizzazione dei tempi operatori.
Restano comunque necessari ulteriori studi per testare le applicazioni della realtà aumentata in ortopedia.

Bibliografia

1 Owens D, Alanah JM, Khazanchi Deepak, et al An Empirical Investigation of Virtual World Projects and Metaverse Technology Capabilities. Data Base for Advances in Information Systems 2011;42:74-101. https://doi.org/10.1145/1952712.1952717.

2 Casini M. Extended Reality for Smart Building Operation and Maintenance: A Review. Energies. 2022;15(10):3785. https://doi.org/10.3390/en15103785.

3 Furman AA, Hsu WK. Augmented Reality (AR) in Orthopedics: Current Applications and Future Directions. Curr Rev Musculoskelet Med. 2021;14;397-405. https://doi.org/10.1007/s12178-021-09728-1.

4 Liu H, Auvinet E, Giles J, et al. Augmented Reality Based Navigation for Computer Assisted Hip Resurfacing: A Proof of Concept Study. Ann Biomed Eng 2018;46:1595-1605. https://doi.org/10.1007/s10439-018-2055-1.

5 Moglia A, Marsilio L, Rossi M, et al. Mixed Reality and Artificial Intelligence: A Holistic Approach to Multimodal Visualization and Extended Interaction in Knee Osteotomy. IEEE J Transl Eng Health Med. 2023;12:279-290. Published 2023 Nov 21. https://doi.org/10.1109/JTEHM.2023.3335608.

6 Wang L, Sun Z, Zhang X, et al. A HoloLens Based Augmented Reality Navigation System for Minimally Invasive Total Knee Arthroplasty. In Intelligent Robotica and Applications: 12th International Conference, ICIRA 2019, Shenyang, China, August 8-11, 2019, Proceedings, Part VI. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2019;519-530. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27529-7_44.

7 Kristensen FB, Lampe K, Wild C, et al. The HTA Core Model®-10 Years of Developing an International Framework to Share Multidimensional Value Assessment. Value Health. 2017;20(2):244-250. https://doi.org/10.1016/j.jval.2016.12.010.

8 O'Rourke B, Oortwijn W, Schuller T; International Joint Task Group. The new definition of health technology assessment: A milestone in international collaboration. Int J Technol Assess Health Care. 2020;36(3):187-190. https://doi.org/10.1017/S0266462320000215.

9 Casari FA, Navab N, Hruby LA, et al. Augmented Reality in Orthopedic Surgery Is Emerging from Proof of Concept Towards Clinical Studies: a Literature Review Explaining the Technology and Current State of the Art. Curr Rev Musculoskelet Med. 2021;14(2):192-203. https://doi.org/10.1007/s12178-021-09699-3

10 Rojo A, Raya L, Sanchez A. A Novel Mixed Reality Solution Based on Learning Environment for Sutures in Minor Surgery. Applied Sciences. 2021;11(5):2335. https://doi.org/10.3390/app11052335.

11 Román-Belmonte JM, ìRodríguez-Merchán EC, De la Corte-Rodríguez H. Metaverse applied to musculoskeletal pathology: Orthoverse and Rehabverse. Postgrad Med. 2023;135:5:440-448. https://doi.org/10.1080/00325481.2023.218095.

12 Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, et al. Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study. Ann Surg. 2002;236(4):458-464. https://doi.org/10.1097/00000658-200210000-00008.