

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA – SCIENZA E INGEGNERIA
Corso di Laurea in Ingegneria e Scienze Informatiche

APPLICAZIONI DELLA MIXED REALITY
IN AMBITO SANITARIO:
STATO DELL'ARTE E PROSPETTIVE
FUTURE

Elaborato in
SISTEMI EMBEDDED E
INTERNET OF THINGS

Relatore
Prof. ALESSANDRO RICCI

Presentata da
NICOLAS PERRONI

Corelatore
Dott. SAMUELE BURATTINI

Anno Accademico 2021 – 2022

*A chi è sempre pronto a sostenermi quando penso di non
farcela: grazie di cuore.*

Indice

Introduzione	vii
1 La realtà mista	1
1.1 L'uomo e il suo ambiente	1
1.2 Collocazione della realtà mista nella realtà estesa	2
1.2.1 Realtà virtuale	2
1.2.2 Realtà aumentata e virtualità aumentata	2
1.2.3 Differenze fra realtà virtuale e realtà aumentata	3
1.2.4 Realtà mista	3
1.2.5 Il metaverso e la proprietà dei dati	4
1.3 Comprensione dello spazio	5
1.3.1 <i>Tracking, registration e calibration</i>	5
1.3.2 Fisicità e interazioni fra oggetti	6
1.3.3 Esperienze multiutente e telepresenza	7
1.4 Interfacce di output: i display	8
1.4.1 La percezione dell'ambiente: i 5 sensi	8
1.4.2 Display visivi	9
1.4.3 Display audio	10
1.4.4 Display di percezione aptica	10
1.4.5 Display olfattivi	11
1.4.6 Display gustativi	11
1.5 Interfacce di input	12
1.5.1 Esempio input forniti da Magic Leap	12
1.6 Casi pratici di utilizzo di XR e mercato	16
2 Introduzione all'uso della realtà mista nel contesto healthcare	17
2.1 La digitalizzazione del campo medico	18
2.1.1 Consulenza a distanza e telemedicina	20
2.1.2 Rapporto medico-paziente	20
2.2 L'evoluzione del <i>medical imaging</i>	21
2.2.1 Confronto tra immagini 2D e 3D	23
2.2.2 La Realtà mista nel medical imaging	23

2.3	Applicazioni pratiche di XR già utilizzate in campo medico . . .	25
2.4	Metodologia di analisi della letteratura	27
2.4.1	Contrasti nelle definizioni di AR e MR	27
2.4.2	Criteri di ricerca e selezione finale	28
2.4.3	Pre-analisi dei risultati	28
3	Applicazioni della MR nel contesto healthcare e prospettive future	33
3.1	Formazione e apprendimento	33
3.1.1	Problemi riscontrati	34
3.1.2	Prospettive future	35
3.2	Chirurgia	35
3.2.1	Problemi riscontrati	36
3.2.2	Prospettive future	37
3.3	Psicoterapia e riabilitazione psicologica	38
3.3.1	L'importanza della percezione nel contesto	39
3.3.2	Problemi riscontrati	40
3.3.3	Prospettive future	40
3.4	Terapia e riabilitazione fisica	41
3.4.1	Problemi riscontrati	42
3.4.2	Prospettive future	42
3.5	Limitazioni di questo studio	43
	Conclusioni	45

Introduzione

Milgram ha introdotto nel 1994 il concetto di *virtuality continuum* che usa questa tesi per collocare la realtà mista all'interno della realtà estesa. Più specificatamente, secondo il modello di Milgram, la realtà mista comprenderebbe la realtà aumentata e la virtualità aumentata e indicherebbe quell'ambiente dove coesistono elementi reali e virtuali. A differenza della realtà virtuale che già sembra essere entrata comunemente nella nostra quotidianità, le applicazioni in realtà mista si sono sviluppate solo negli ultimi anni principalmente a causa delle sfide hardware e tecnologiche che le caratterizzano. I recenti sviluppi di dispositivi facilmente reperibili, come HoloLens o MagicLeap, hanno contribuito ad accelerare la ricerca.

Lo scopo di questa tesi è di analizzare gli utilizzi della realtà mista in ambito sanitario. Partendo dalle applicazioni individuate in letteratura, l'intento finale è di individuare le sfide o i limiti della tecnologia maggiormente riportati per riuscire infine ad aiutare o ispirare ricerche future.

Capitolo 1

La realtà mista

1.1 L'uomo e il suo ambiente

L'essere umano ha da sempre uno stretto rapporto con il proprio ambiente. In particolare, l'uomo ha sempre cercato di migliorare il suo ambiente fisico per adattarlo alle proprie esigenze o per rendere la propria vita più facile. L'abilità con la quale l'essere umano è riuscito a fare un migliore uso del proprio ambiente è dipesa anche dalle tecnologie in quel momento disponibili: l'agricoltura e l'allevamento gli hanno permesso di rinunciare ad una vita nomade, le prime città sorgevano vicino ai fiumi, ma il progredire delle tecnologie e delle conoscenze gli ha permesso di colonizzare territori prima ritenuti poco adatti alla sopravvivenza. Se in un primo momento possiamo pensare alle alterazioni effettuate all'ambiente come alterazioni fisiche in un mondo fisico, l'arrivo dell'informatica ha segnato un cambiamento permettendo una rappresentazione digitale delle informazioni dando vita a veri e propri elementi virtuali. L'uso di computer in grado di raccogliere e manipolare velocemente informazioni ha abilitato nuovi modi per migliorare il proprio ambiente. Internet ha permesso di condividere queste informazioni più facilmente e di creare reti interconnesse di dispositivi. Simulazioni e modellazioni sempre più precise assottigliano il confine fra "reale" e "virtuale". Tutti questi passi abilitano tecnologie che consentono di aumentare il valore fornito dal proprio ambiente aggiungendo elementi digitali che non richiedono di alterarlo fisicamente [13]. Con questa prospettiva possiamo ritenere la realtà mista come una fase successiva dell'evoluzione del nostro modo di influenzare l'ambiente: oggetti virtuali *immersi* nell'ambiente fisico con l'intento di aumentarne il valore.

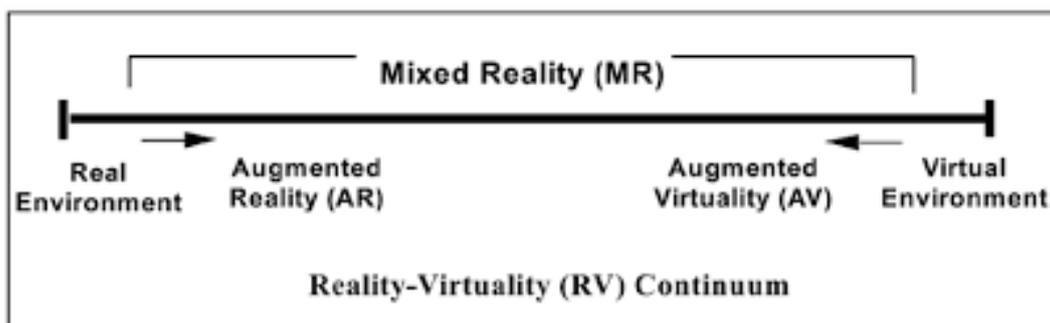


Figura 1.1: *Rappresentazione semplificata del reality/virtuality continuum (Milgram 1994 [41])*

1.2 Collocazione della realtà mista nella realtà estesa

Il termine realtà estesa (XR) è un termine per indicare l'insieme di tutti gli altri tipi di realtà dalla realtà aumentata fino alla realtà virtuale. Con il termine "virtuale" indichiamo qualcosa che rappresenta un'entità fisica, ma è priva di un corpo fisico. Per differenziare i vari tipi di realtà Milgram [41] utilizza una sua idea: il *virtuality continuum* (figura 1.1). Questa rappresentazione grafica vede agli estremi la realtà fisica e la realtà virtuale e le altre realtà come scale di "virtualità" dell'ambiente circostante.

1.2.1 Realtà virtuale

Il contatto con il mondo reale è nullo, anzi: la realtà virtuale si colloca completamente in uno spazio digitale occultando completamente il mondo fisico. L'invito della realtà virtuale è quello di estraniarsi il più possibile anche limitando stimoli esterni.

1.2.2 Realtà aumentata e virtualità aumentata

Lo scopo della realtà aumentata (AR) è creare un collegamento tra il mondo fisico e le informazioni digitali. La definizione e la classificazione della realtà aumentata è notevolmente dibattuta in letteratura e si intende, nei casi più elastici, quei contesti dove l'ambiente reale gioca un ruolo importante della scena e viene "aumentato" con l'aiuto di informazioni digitali [9] [20]. In accordo con R. T. Azuma [5] vengono elencate le caratteristiche necessarie per definire quello che è "realtà aumentata" secondo questa tesi:

- il mondo fisico è aumentato con informazioni digitali;

- le informazioni sono mescolate (*registration*) nell'ambiente fisico tenendo conto della posizione e della prospettiva dell'osservatore nell'ambiente;
- l'utente può interagire con le informazioni (girare attorno ad un oggetto virtuale viene intesa come interazione).

Spesso il concetto di "aumentato" viene inteso come "aggiungere", ma è importante notare che a volte l'intento potrebbe essere quello di "togliere" informazioni non necessarie [13]. Il caso opposto alla realtà aumentata sulla scala del *virtuality continuum* è la virtualità aumentata dove il protagonista non è più l'ambiente fisico, ma un ambiente virtuale aumentato con informazioni fisiche.

1.2.3 Differenze fra realtà virtuale e realtà aumentata

La realtà virtuale crea una realtà specifica differente da quella reale, mentre la realtà aumentata implementa quella reale. Mentre la realtà virtuale si deve occupare solo di calcolare lo stato del mondo virtuale, la realtà aumentata ha la necessità di dover determinare lo stato anche del mondo fisico (*tracking*) e, in aggiunta, dover allineare gli oggetti virtuali nel mondo fisico appena tracciato (*registration*). Lo scopo che le due tecnologie si propongono è quindi opposto: la VR cerca di catapultare l'utente in un mondo "magico" portandolo in una realtà esterna, mentre la AR vuole che l'utente rimanga legato al suo mondo fisico e cerca di aggiungere oggetti "magici" a quella realtà propria dell'utente.

1.2.4 Realtà mista

Spesso con il termine realtà mista o *mixed reality* (MR) si indica tutte quelle scale di valori che vanno dalla realtà aumentata (AR) alla virtualità aumentata (AV) incluse. Da questo punto di vista può essere intesa come un termine ombrello che spazia dai casi dove il focus è un ambiente reale aumentato con informazioni digitali (AR) fino a comprendere i casi dove il focus è un ambiente virtuale aumentato con informazioni reali (AV) [41].

Generalmente un'applicazione MR richiede l'applicazione di diverse tecnologie. Per integrare correttamente gli oggetti virtuali nell'ambiente reale è innanzitutto richiesta una ricostruzione digitale dell'ambiente tramite sensori e, successivamente, posizionare secondo precise coordinate gli oggetti virtuali nella ricostruzione. Una volta ricostruito digitalmente l'ambiente con tutti gli elementi aggiuntivi bisogna calcolare la posizione dell'utente per sapere quale deve essere il suo punto di vista prestando attenzione a fattori come il suo campo visivo e l'occlusione.

La grande mole di dati raccolti dai dispositivi per permettere il funzionamento delle applicazioni è un tema recentemente accentuato dall'arrivo delle grandi compagnie nel mondo della XR e del metaverso.

1.2.5 Il metaverso e la proprietà dei dati

Lik-Hang Lee [38] vede come punto focale del metaverso un "internet più immersivo" come un mondo "grande, unificato, persistente e condiviso" spiegando come il termine sia volto a catalizzare la trasformazione in digitale di ogni aspetto fisico del mondo reale. All'interno del metaverso è possibile scegliere il proprio personaggio o la propria identità virtuale volta a rappresentarci in quel mondo chiamata *avatar*. Solo per la piattaforma Roblox è stata calcolata nel mese di dicembre 2022 una media di 61,5 milioni di utenti attivi al giorno sul metarverso con un aumento di circa il 18% anno dopo anno¹. Pwc stima una crescita annua del mercato del metaverso di circa il 43.3% che porterà ad un valore totale del mercato di circa 829 miliardi di dollari nel 2028².

All'interno del metaverso lo scambio di denaro è principalmente effettuato tramite criptovaluta, ma è attualmente esente dai controlli *Know Your Customer* (KYC) imposti dalle norme antiriciclaggio dell'Unione Europea³. La mancanza di verifica dell'identità al momento di creazione dell'avatar risulta una questione spinosa anche in tema etico e morale. Altro punto importante quando si parla di metaverso riguarda la grandissima mole di dati che raccoglie il dispositivo indossato come conformazioni fisiche dell'utente: del volto, degli occhi, delle mani o anche il timbro della voce ossia quei dati che possono identificare univocamente una persona. Questa problematica legata ai dati era già stata evocata da John Rousseau nel 2016 nella sua proposta delle "leggi della realtà mista" ⁴. Lo scopo di queste leggi è permettere alla realtà mista di avere un impatto positivo sulla società. Le tre leggi promosse da Rousseau sono:

- "La realtà mista deve migliorare la nostra capacità di attenzione consapevole" - ridurre i rischi legati alle nostre capacità di concentrazione e focus creati dagli aspetti di dipendenza dalla tecnologia.
- "La realtà mista deve incarnare un'esperienza umana condivisa" - facilitare la condivisione e la connessione umana.

¹<https://ir.roblox.com/news/news-details/2023/Roblox-Reports-December-2022-Key-Metrics/default.aspx>

²<https://www.pwc.in/consulting/technology/emerging-tech/how-is-the-metaverse-set-to-shape-the-future-of-business.html>

³https://it.wikipedia.org/wiki/know_your_customer

⁴<https://www.kurzweilai.net/the-laws-of-mixed-reality-without-the-rose-colored-glasses>

- "La realtà mista deve rispettare i confini tra commercio e dati" - I dati raccolti dalle tecnologie saranno sempre più precisi e la quantità di informazioni raccolte aumenterà creando la necessità di nuove regole per rispettare la privacy personale.

1.3 Comprensione dello spazio

Nei contesti informatici lo spazio è puramente rappresentato da dei concetti matematici governati unicamente dalle regole che gli sono state impartite da chi lo ha sviluppato. Dal momento che la realtà mista lavora in un ambiente fisico con costrutti virtuali è importante capire come questi vengano introdotti nell'ambiente fisico. Innanzi tutto è fondamentale riuscire a ricostruire al meglio l'ambiente fisico e crearne un gemello digitale (*tracking*). All'interno dell'ambiente digitale possiamo poi posizionare i nostri elementi secondo le coordinate del modello per essere visualizzati correttamente nell'ambiente fisico (*registration*). Il processo di *registration* è fondamentale per creare certe dinamiche come l'occlusione (stabilire quale elemento è in primo piano rispetto ad un altro) o individuare se avvengono interazioni fra oggetti fisici e virtuali.

1.3.1 *Tracking, registration e calibration*

Tracking, registration e calibration sono i tre processi che definiscono l'allineamento fra elementi virtuali e reali [58] (Figura 1.2).

Intendiamo con *tracking* quel processo di rilevamento in tempo reale di elementi fisici o misure. Oltre all'ambiente circostante possono essere rilevate anche entità come mani (per capire se sia necessario ricreare un'interazione), testa (per capire il punto di vista di chi sta osservando), occhi (per capire cosa mettere a fuoco nelle immagini) e molti altri elementi [58].

La *calibration* è necessaria per allineare due o più misure effettuate da due strumenti decidendo se e quale strumento deve essere calibrato in base all'altro. A differenza del *tracking* non richiede necessariamente di essere continuamente attiva (*autocalibration*), ma può essere svolta a intervalli regolari quando necessario [58].

Per *registration* intendiamo l'allineamento delle coordinate fra oggetti virtuali e reali [58]. La *registration* può essere statica se chi interagisce con l'ambiente non è in movimento o dinamica se deve essere ricostruita nel tempo. La *registration* dinamica richiede continuamente di effettuare anche il *tracking*. Se infatti l'utente si muove nell'ambiente è necessario ricalcolare continuamente la sua posizione nel modo più veloce e preciso possibile per ricreare una scena attendibile. Nonostante il grosso impegno per migliorare le tecnologie di *tracking*, i processi di *tracking* e *registration* sono una delle difficoltà maggiori nel

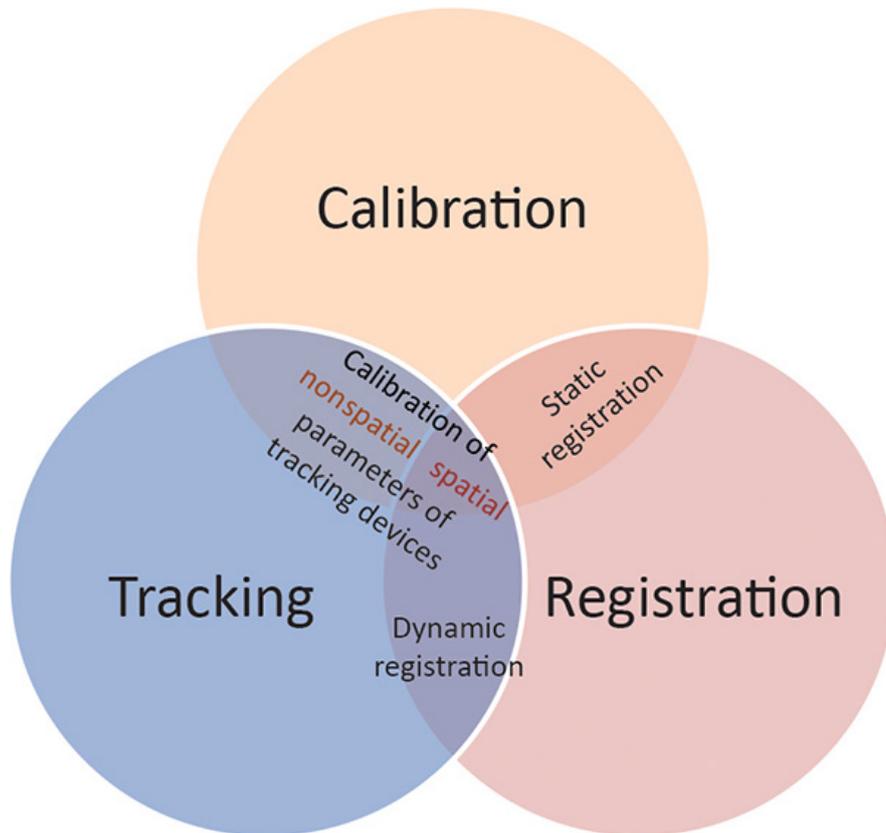


Figura 1.2: *Come sono legati i processi di tracking, registration e calibration [58])*

campo della realtà mista specialmente in ambienti molto ampi come gli spazi aperti [9].

1.3.2 Fisicità e interazioni fra oggetti

Posizionare correttamente un elemento virtuale in un contesto fisico dato il punto di vista dell'utente non basta a ricreare una scena credibile. Per ricreare la scena dell'ambiente è necessario ricostruire il punto di vista dell'utente tenendo conto delle oclusioni create fra oggetti virtuali e reali. Alcune strategie per determinare le oclusioni fanno uso di buffer di profondità (z-buffer) che aggiungono una coordinata di profondità alla scena o tecniche di *raycasting* che utilizzano raggi virtuali che partono dal punto focale dell'utente fino alla prima superficie colpita [58].

Anche la luce e le ombre giocano un ruolo importante. Il comportamento di un oggetto verso la luce che lo illumina può rivelare molto rispetto al suo

stato materiale: se blocca la luce, se si lascia attraversare o se la riflette. L'ombra creata da un oggetto può fornire informazioni circa la sua geometria e la profondità della scena. L'angolo di proiezione e la nitidezza dell'ombra possono fornire informazioni circa la distanza e il suo posizionamento [58].

Per ricreare una scena ancora più reale si può tenere conto delle interazioni fra oggetti virtuali e reali dotandoli di un comportamento fisico in accordo con le leggi naturali. Aggiungere concetti come la gravità, il contatto e il modellare lo stato materiale possono ricreare una migliore esperienza di immersione se modellate correttamente. Quando creiamo degli oggetti virtuali vogliamo che questi rispondano quindi a dei comportamenti fisici: un bicchiere probabilmente non dovrebbe fluttuare a mezz'aria senza qualcosa che lo trattenga dal cadere (gravità), potrebbe frantumarsi cadendo (stato materiale vetro) e il liquido al suo interno non dovrebbe frantumarsi, ma spargersi sul pavimento (stato materiale liquido). Alcuni tipi di interazioni possono richiedere il riconoscimento di oggetti fisici per individuarne le finalità, ad esempio una sedia. In generale è importante quindi tenere conto sia del modo in cui proverà l'utente ad interagire con il proprio ambiente sia l'effetto che si aspetta avrà la sua azione.

1.3.3 Esperienze multiutente e telepresenza

La telepresenza rappresenta quel concetto di percepire e interagire con un ambiente pur non essendo fisicamente lì presente. Il modo in cui si interagisce con l'ambiente remoto segna la differenza con il concetto di "controllo remoto". Per essere considerata realtà aumentata si dovrebbe essere portati ad immergersi nell'ambiente che si sta controllando come se si fosse esattamente lì: spingere un tasto per accendere una lampada presente in una stanza distante chilometri è controllo remoto, ma ricostruire la stanza della lampada, immergerci l'utente e tracciarne i movimenti per capire che sta interagendo con l'interruttore sarebbe considerata telepresenza [13].

Esperienze multi-utente e oggetti persistenti

Per creare un ambiente condiviso è necessario stabilire delle regole comuni per la ricostruzione dell'ambiente e la posizione degli oggetti virtuali ivi collocati. Per fornire un'idea migliore di cosa questo possa comportare viene descritto in seguito il caso specifico di Magic Leap⁵. Per persistenza si intende la possibilità di condividere elementi digitali fra device diversi, mantenere la posizione degli elementi digitali anche al reboot del device e collegare gli oggetti digitali immersi nell'ambiente circostante in relazione all'ambiente stesso. Per

⁵<https://www.magicleap.com/>

determinare la posizione e la rotazione di questi oggetti vengono individuate delle "ancore digitali" nel mondo fisico chiamate Persistent Coordinate Frames (PCFs). Ogni PCF è individuata tramite un ID univoco e può essere utilizzata da tutte le applicazioni per registrare la posizione di un nuovo elemento digitale in quell'ambiente in relazione ad esso. L'algoritmo di monitoraggio del mondo reale assicura la presenza di almeno una PCF in ogni ricostruzione.

Ogni device individua la propria posizione come origine delle coordinate del mondo x,y e z rispettivamente $(0,0,0)$. Più device possono condividere la stessa mappa di un ambiente, le sue PCF e le coordinate di queste in relazione all'origine del mondo del device che le individua. Ogni PCF avrà quindi una posizione relativa diversa, ma sarà possibile per tutti gli altri device ricalcolare la posizione di questa in base alle proprie coordinate e, infine, individuare le posizioni di tutti gli oggetti ad essa ancorati.

1.4 Interfacce di output: i display

I display utilizzati in realtà aumentata combinano stimoli digitali e reali. Sebbene il senso più accostato al concetto di realtà aumentata sia quello visivo, esistono molti altri tipi di display, definiti multimodali, che interessano altri sensi. Il termine "display" per indicare anche dispositivi non unicamente visivi è usato in accordo con Schmalstieg et al [58].

1.4.1 La percezione dell'ambiente: i 5 sensi

Per capire le opportunità che mette a disposizione la realtà mista può essere interessante soffermarsi un momento a riflettere come noi esseri umani percepiamo il nostro ambiente. Nel lessico comune intendiamo con "percezione" l'atto del prendere coscienza di una realtà che si considera esterna a noi⁶. Dal punto di vista psicologico, Koffka⁷ definisce la percezione come il processo attraverso il quale riceviamo stimoli che organizziamo per attribuire un significato allo scopo di interpretare il nostro ambiente circostante [36]. Il tema della percezione è molto vasto e suddivideremo per semplicità la percezione in:

- visiva
- uditiva
- olfattiva

⁶<https://www.treccani.it/enciclopedia/percezione>

⁷K. Koffka (Berlino, 18 Marzo 1886 – Northampton, 22 Novembre 1941) è stato uno dei fondatori della corrente della Gestalt. Pubblica nel 1924 pubblica "La crescita della mente" e nel 1935 "Principi di psicologia della forma".

- tattile
- gustativa

Nonostante la realtà mista sia principalmente associata alla vista essa può coinvolgere tutti gli altri sensi attraverso quelle che vengono definite interfacce/display multimodali. L'essere umano dispone di diversi modi per interagire con il proprio ambiente [13]. Le tecnologie attuali messe a disposizione della realtà mista permettono di combinare stimoli virtuali e reali. Gli attuali display utilizzati nei contesti di realtà mista integrano anche la possibilità di fornire stimoli che non siano unicamente visivi [58].

1.4.2 Display visivi

L'occhio umano è complesso e per comprendere meglio le tecnologie coinvolte nella realtà mista è necessario conoscere i processi che coinvolgono questo organo. A titolo informativo, ma non esaustivo, citiamo i movimenti di vergenza e l'accomodazione. I movimenti di vergenza sono quei movimenti consentono di mantenere sulla fovea effetti visivi che si allontanano o avvicinano⁸. L'accomodazione è quel processo di cambio di curvatura del cristallino per regolare la luce in ingresso. Questi processi sono accoppiati per permetterci di mantenere a fuoco oggetti vicini o lontani [4]. Riuscire a percepire questi processi è importante per i display visivi per decidere cosa mettere a fuoco nell'immagine da mostrare per un migliore effetto di immersione. In generale, possiamo individuare 3 macrocategorie di display visivi utilizzati nel campo della mixed reality: *head mounted displays* (HMD), *spatial displays* e *handheld displays*.

I display HMD si indossano sulla testa come parte di un casco e proiettano le immagini (reali e virtuali) davanti alla vista dell'utente. Questi display possono interessare entrambi gli occhi (binoculari) o soltanto uno (monoculare). Il modo di far visualizzare l'ambiente all'utente può essere *video-see-through* o *optical-see-through*. I sistemi *video-see-through* hanno maggiori richieste hardware dal momento che richiedono all'utente di indossare due telecamere sulla testa dell'utente per processare l'ambiente. I sistemi *optical-see-through* d'altro canto permettono la visione diretta del mondo reale attraverso lo schermo, ma necessitano di tecnologie particolari per sovrapporre gli elementi virtuali all'immagine reale. Questi ultimi offrono ovviamente una visione perfetta dell'ambiente reale, ma sono più suscettibili a problemi come la latenza di calcolo per la produzione delle immagini da visualizzare che devono essere registrate in un ambiente la cui immagine non può essere ritardata [20].

⁸<https://www.treccani.it/enciclopedia/>

Gli *spatial displays* non richiedono all'utente di indossare il display e fanno uso di videoproiettori, ologrammi e tecnologie di tracciamento per visualizzare informazioni digitali nell'ambiente. Questo consente a questa tipologia di dispositivi di essere più scalabile con l'aumentare del numero di utenti coinvolti [20].

Gli *handheld displays*, anche chiamati display mobili, riguardano quei device come tablet e smartphone. Dal momento che questi dispositivi sono dotati di telecamera fanno uso delle tecnologie *video-see-through*. Nonostante la sensoristica dei device non sia stata pensata apposta per le applicazioni di realtà aumentata, esistono piattaforme come ARToolKit che rendono possibile sviluppare applicazioni su questi device.

1.4.3 Display audio

Un altro elemento utilizzato per migliorare l'esperienza dell'utente in contesti di realtà mista è l'audio. Il nostro cervello è in grado di discriminare e localizzare i suoni. Molti display (come Meta 2 e Microsoft HoloLens) supportano quello che viene chiamato audio spaziale. Attraverso la posizione della testa, le recenti tecnologie permettono di ricostruire un suono come se avesse origine da un punto preciso dell'ambiente attorno [58]. Per determinare la posizione orizzontale di un suono sono determinanti la differenza di tempo di arrivo (ITD - Interaural Time Difference) e di intensità (IID - Interaural intensity difference). I suoni viaggiano nello spazio e arrivano alle nostre orecchie con tempi differenti. Questa differenza di tempo è indicata con la sigla ITD e, più questa differenza è marcata, più la fonte sonora si troverà definita verso destra o sinistra [4]. Allo stesso modo anche l'intensità subirà variazioni sia per il variare della distanza sia perché la nostra stessa testa interferisce con l'onda sonora [4].

1.4.4 Display di percezione aptica

Con la parola percezione aptica indichiamo l'insieme dei sensi cinestetico e tattile. Le informazioni relative ai movimenti ad ai sensi sono trasportate dal nostro sistema nervoso somatico dal corpo al sistema nervoso centrale e viceversa. Il sistema nervoso somatico si divide, ai fini di questa tesi, in due parti principali: senso cinestetico (o propriocezione) che è la capacità di percepire i nostri muscoli e tendini (come nel caso della contrazione)⁹ e senso tattile ovvero la capacità di percepire le caratteristiche fisiche e stimoli meccanici a contatto con la superficie esterna del nostro corpo¹⁰.

⁹<https://it.wikipedia.org/wiki/Propriocezione>

¹⁰<https://www.humanitas.it/enciclopedia/anatomia/organi-di-senso/tatto/>

Nel processo di percezione tattile che permette al nostro cervello di comprendere l'ambiente sono principalmente coinvolti tre categorie di ricettori volti ad indentificare stimoli: meccanici (meccanocettori), termici (termocettori) e dolorifici (nocicettori) [4]. Differentemente dai sensori tattili che necessitano di stimoli esterni per generare una risposta neurale, i ricettori cinestetici sono attivati inconsciamente dal nostro stesso corpo [4]. Un esempio pratico di questi ricettori è dato dal fatto che siamo consci di avere un braccio alzato senza doverlo effettivamente vedere.

Data la notevole difficoltà nel ricostruire uno stimolo sensoriale aptico realistico partendo da oggetti che non dispongono delle giuste proprietà, le applicazioni di questi display nella realtà aumentata sono attualmente relativamente limitate [58].

1.4.5 Display olfattivi

Il senso umano che ci permette di percepire gli stimoli odorosi è l'olfatto. La categoria di recettori che raccoglie questi stimoli è quella dei chemorecettori e si trovano in una particolare area della mucosa nasale chiamata mucosa olfattiva. Nonostante l'uomo appartenga alla categoria dei mammiferi con l'olfatto meno sviluppato (animali microsmatici), l'olfatto raccoglie comunque una certa importanza data anche la sua forte relazione con il gusto¹¹.

Attualmente esistono sia display indossabili sia esterni che permettono di riprodurre odori. Una delle sfide maggiori che riguardano i dispositivi esterni consiste nel dirigere attraverso l'aria i profumi in modo diretto [58]. Un esempio di display indossabile è quello realizzato da Yamada e colleghi [68]. Questo dispositivo convoglia gli odori direttamente nel caso dell'utente attraverso dei tubi. Il sistema generale era in grado di regolare l'intensità degli odori a seconda della posizione dell'utente e della posizione della fonte. Con questo prototipo l'utente era in grado di determinare la posizione nell'ambiente di una precisa fonte di odori. Uno dei problemi riscontrati durante la creazione del prototipo è stata la dispersione involontaria degli odori nell'ambiente. Il problema è stato risolto cambiando lo stato degli odori trattati da stato gassoso a stato liquido somministrati attraverso una testina a getto d'inchiostro [68].

1.4.6 Display gustativi

Il gusto è quel senso specifico mediante il quale riconosciamo il sapore delle sostanze che mangiamo. Come nel caso dell'olfatto, gli organi del gusto sono categorizzati come chemorecettori. In aggiunta alla lingua, alcuni autori

¹¹<https://www.treccani.it/enciclopedia/olfatto/>

ritengono presenti organi del gusto sul velopendolo, nella faringe e sulla faccia posteriore dell'epiglottide¹².

I display del gusto sono quelli più raramente utilizzati probabilmente a causa della notevole difficoltà nel ricostruire gusti arbitrari dai sapori di base [45]. Questi display sono spesso associati a display visivi e olfattivi perché è noto che olfatto e vista possano modificare la percezione del gusto [45]. Un esempio di display del gusto è quello realizzato da Iwata et al [33] il cui scopo era quello di riuscire a simulare alcuni cibi. Iwata et al definiscono la nascita del gusto da una combinazione di sensazioni uditive, olfattive, tattili e chimiche [33]. Il loro simulatore permette di creare una forza di resistenza ai morsi come sensazione di consistenza. A questa percezione sono stati aggiunti un display uditivo e chimico per ricreare tutte le sensazioni dell'assaggio.

1.5 Interfacce di input

La letteratura mette a disposizione molti esempi di input forniti dai dispositivi. È importante precisare che, generalmente, i criteri principali che portano alla scelta di un metodo rispetto ad un altro è dettato da: praticità del contesto, affidabilità o un compromesso fra le due. Se, ad esempio, si pensasse ad un metodo di input durante la guida, potrebbe essere interessante valutare l'uso di comandi vocali per mantenere il controllo del volante. Ovviamente tratteremo solo degli input forniti dai costruttori, ma niente impedirebbe di creare un costrutto virtuale, come un bottone, e usare i sensori del dispositivo per percepire le interazioni dell'utente poiché, in un contesto di realtà mista, praticamente tutto può essere usato come input. A solo scopo di esempio per fornire un'idea generale dello stato della tecnica, vengono descritti gli input forniti dal dispositivo Magic Leap.

1.5.1 Esempio input forniti da Magic Leap

L'immagine 1.3 mostra tutti i possibili metodi di input supportati dal Magic Leap¹³. Alcune tecnologie possono avere affidabilità diversa fra utente e utente o a seconda dell'ambiente circostante. La tabella 1.1 mostra l'affidabilità di questi input secondo i dati del costruttore. In questa sezione analizzeremo alcuni di questi metodi dal punto di vista di output restituito all'applicazione.

¹²<https://www.treccani.it/enciclopedia/gusto/>

¹³<https://www.magicleap.com/>

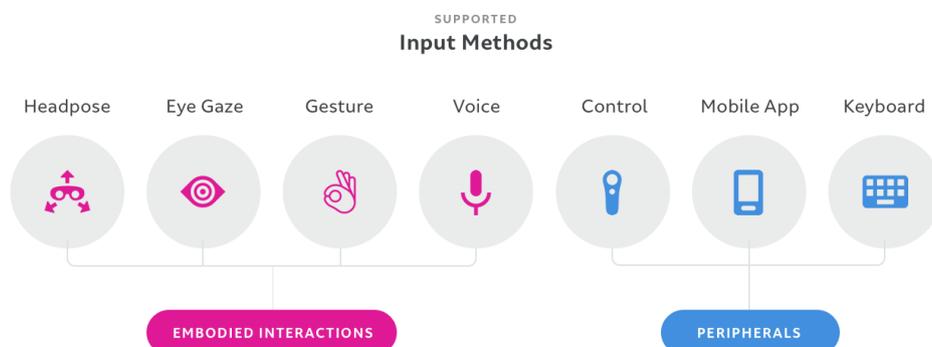


Figura 1.3: Metodi di input

Input	Affidabilità
Control(ML 1)	Affidabile. Metodo di input consigliato.
Mobile App	Usabile. Metodo di input secondario consigliato.
Tastiera BT	Usabile. Metodo di input consigliato in caso sia necessario un input testuale molto lungo.
Orientamento della testa	Affidabile. Metodo di input consigliato.
Sguardo	Usabile. Dipendente dalla calibrazione.
Gesti	Input emergente. Supporto limitato durante la navigazione attraverso il sistema operativo.
Voce	Input emergente. Supporto anche per la dettatura.

Tabella 1.1: Tabella dell'affidabilità dei metodi di input

Controller

Come detto in precedenza, la posizione e l'orientamento del Controller è calcolata con 6 gradi di libertà(6DOF). In particolare per quanto riguarda Unity, l'origine è individuata al centro del touchpad, l'asse X punta alla sua destra, l'asse Y punta verso l'alto mentre l'asse Z parte dal bottone bumper 21 gradi sotto la superficie del touchpad (figura 1.4). Il touchpad è bidimensionale lungo gli assi X e Y e restituisce valori come coordinate compresi fra +1.0 e -1.0 lungo entrambi gli assi. Queste coordinate possono essere utilizzate per

riconoscere i movimenti eseguiti dall'utente sul touchpad oltre allo stato di 0 (non premuto) e 1 (premuto). Il tasto bumper restituisce un valore 0 (non premuto) o 1 (premuto). Il trigger è una leva analogica e può assumere valori in un intervallo da 0.0 a 1.0 in base a quanto viene premuta.

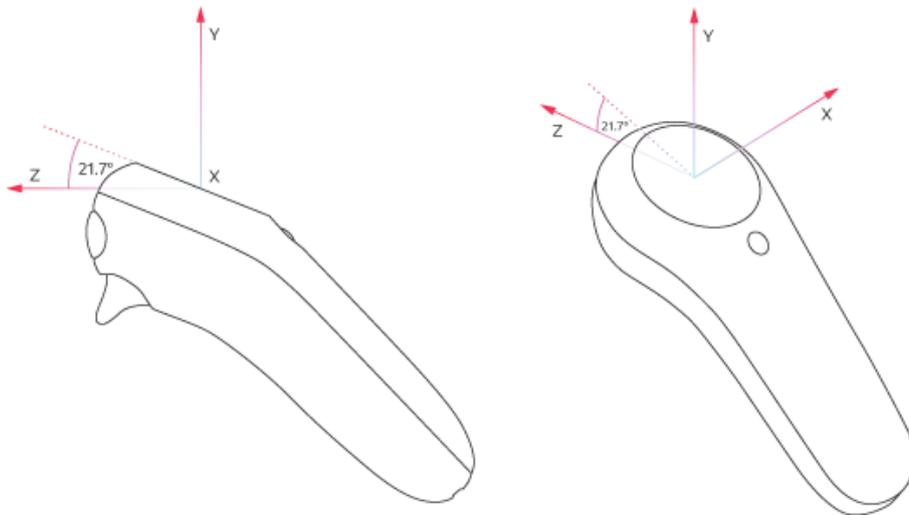


Figura 1.4: Disposizione degli assi nel Controller

Handtracking

Il sistema riesce a riconoscere le mani dell'utente, distinguendo destra e sinistra. In generale, possono essere riconosciute 8 posizioni (gesti) riportate nella figura 1.5. Per il loro riconoscimento Magic Leap individua molteplici punti chiave su ogni mano (figura 1.6) associando ad ognuno di questi un proprio ID univoco e una posizione 3D qualora questo punto non sia occluso. Ovviamente per individuare questi punti, e quindi per riconoscere i gesti, è necessario che vengano eseguiti nel campo visivo del device.

Il codice riguardante il *tracking* della mano (punti chiave e gesti) è contenuto nel kit di sviluppo fornito da Magic Leap.

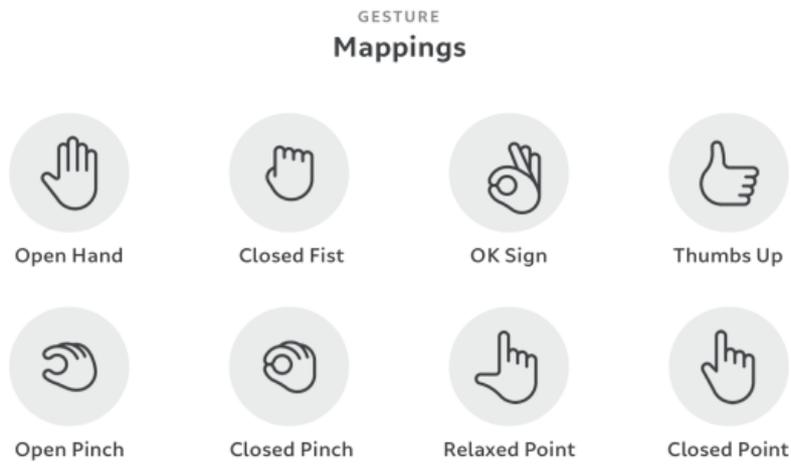


Figura 1.5: Gesti

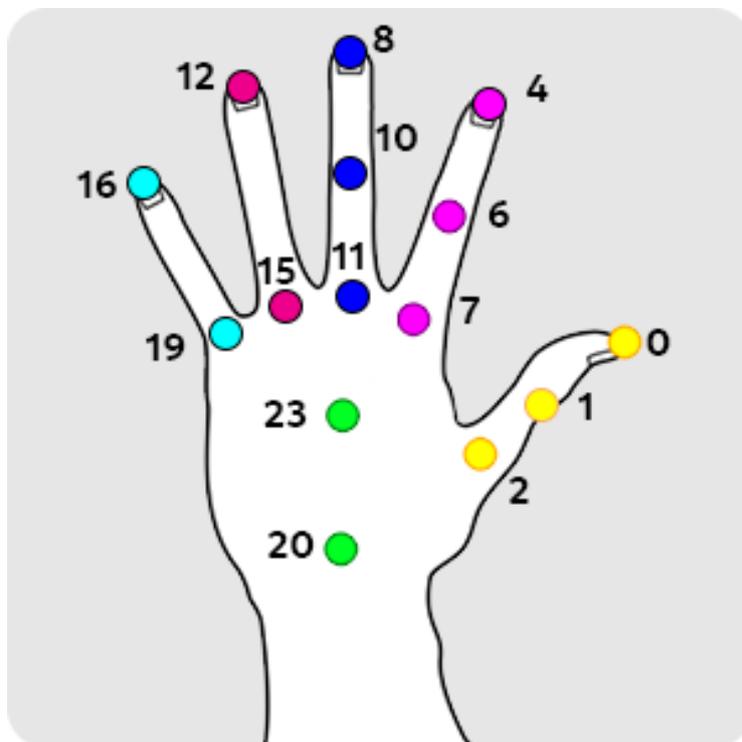


Figura 1.6: Punti individuati sulla mano

1.6 Casi pratici di utilizzo di XR e mercato

Le proiezioni di mercato circa la realtà estesa sono molto promettenti e prevedono un CAGR¹⁴ del 25-40%¹⁵. Parleremo di realtà estesa poiché il termine realtà mista viene spesso interpretato in modo diverso a seconda delle fonti. Nel mercato attuale la realtà virtuale ha una leadership netta favoreggiata dalla miglior accessibilità dei dispositivi VR¹⁶.

Alcune compagnie si sono già messe in movimento sul tema. A maggio 2022 Tata Elxsi e Levono hanno collaborato per creare soluzioni basate sulla realtà estesa applicazioni aziendali e di ingegneria. Queste soluzioni si distribuiscono dalla progettazione ingegneristica fino alla collaborazione remota e formazione dei lavoratori¹⁷. Ad agosto 2022 TeamViewer ha dichiarato di aver avviato una partnership con Siemens Digital Industries Software per integrare Frontline (piattaforma AR di TeamViewer) con Teamcenter (software di gestione del ciclo di vita dei prodotti di Siemens). Secondo le due compagnie, l'introduzione della MR nei processi produttivi migliora le informazioni a disposizione dei lavoratori permettendo di prendere decisioni più consapevoli durante i processi¹⁸.

Una collaborazione fra Microsoft e Harvard Business Review Analytic Services ha indagato come viene e potrebbe essere utilizzata la realtà mista nel mondo lavorativo attuale¹⁹. Nel sondaggio creato hanno partecipato 394 aziende (di almeno 250 dipendenti) in diversi campi industriali. Vengono citati alcuni risultati interessanti:

- l'87% degli intervistati sta esplorando il campo della MR o sta già sviluppando tecnologie nell'ambito.
- I maggiori benefici individuati dagli intervistati: didattica/training degli impiegati (57%), visualizzazione e analisi dei dati (57%) e assistenza clienti o impiegati da remoto (50%).

¹⁴def. CAGR da borsaitaliana.it: "Il tasso annuo di crescita composto, più comunemente noto come CAGR dall'acronimo anglosassone Compounded Average Growth Rate, rappresenta la crescita percentuale media di una grandezza in un lasso di tempo"

¹⁵<https://www.marketresearchfuture.com/reports/mixed-reality-healthcare-market-8013>

¹⁶<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/augmented-reality-mixed-reality-market>

¹⁷<https://www.tataelxsi.com/news-and-events/tata-elxsi-and-lenovo-collaborate-to-provide-proven-scalable-and-easy-to-deploy-xr-solutions-for-enterprise>

¹⁸<https://www.xrtoday.com/mixed-reality/teamviewer-siemens-partner-to-boost-ar-enterprise-tools/>

¹⁹<https://hbr.org/>

Capitolo 2

Introduzione all'uso della realtà mista nel contesto healthcare

Il caso di studio vuole analizzare l'utilizzo della realtà mista nel contesto *healthcare*. Per farlo, verrà adottato un approccio top-down, spiegando prima il contesto della medicina che generalmente intende sempre più digitalizzarsi e, successivamente, analizzeremo lo stato dell'arte attuale spiegando come la realtà mista abbia le potenzialità per rappresentare l'evoluzione successiva. In particolare, il ruolo che può avere realtà mista nel *medical imaging* e come ci siano già casi pratici di utilizzo di tecnologie XR in campo sanitario.

Lo scopo finale di questo capitolo è fornire gli elementi chiave che hanno direzionato la selezione della letteratura analizzata nel capitolo successivo.

2.1 La digitalizzazione del campo medico

Il campo della medicina ha la possibilità di ricevere una forte crescita grazie ai progressi della tecnologia in ambito sanitario. Tutte queste nuove tecnologie danno la possibilità di migliorare le diagnosi, i trattamenti e aumentare le possibilità di salvare vite umane. Per accogliere queste nuove tecnologie è necessario modernizzare i sistemi e muoversi verso una sanità più digitalizzata che accolga la tecnologia tra tutti suoi processi. L'Organizzazione Mondiale della Sanità definisce il termine eHealth come "l'uso di tecnologie informatiche e di telecomunicazioni (ICT) per la tutela della salute"¹. È spesso usato come termine ombrello per concetti come "Connected Health" e "Digital Health" e comprende una vasta gamma di servizi tra i quali:

- fascicolo clinico elettronico per una più veloce condivisione dei dati del paziente;
- sistemi informatici sanitari per creare soluzioni sia per il paziente (es. prenotazioni visite) sia per una miglior gestione del personale;
- mHealth, ovvero l'uso di dispositivi *mobile* per il monitoraggio del paziente;
- telemedicina

L'uso di questo termine indica quindi l'uso di tecnologie digitali che mirino a favorire una transizione verso un'innovazione tecnologica a vantaggio della salute umana. Anche la Commissione Europea ha promosso il uso intento di voler portare la sanità ad un livello più digitalizzato con la pubblicazione de "Commission's Communication on the Transformation of Digital Health and Care"² nel 2018, identifica tre pilastri principali che mira a realizzare:

- accesso sicuro a dati condivisi. La Commissione intende sviluppare un'infrastruttura digitale (eHDSI) con lo scopo di permettere prescrizioni elettroniche e scambio di fascicoli dei pazienti fra tutti gli attori sanitari. In particolare, si intende abbattere i limiti transfrontalieri permettendo a ogni cittadino europeo i giusti accessi sanitari indipendentemente dal proprio stato natale.
- condivisione dati per ricerca, diagnosi più veloci e miglioramenti della salute con lo scopo di migliorare la prevenzione, diagnosi e trattamenti.

¹<https://www.who.int/ehealth/about/en/>

²<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2018:233:FIN>

- rafforzare l'*empowerment* dei cittadini e l'assistenza individuale attraverso i servizi digitali. Migliorare la consapevolezza di ogni individuo per renderlo in grado di prendersi cura della propria salute seguendo stili di vita sani.

Il problema di un modello di assistenza sanitaria sostenibile

Una delle più importanti sfide che l'assistenza sanitaria si troverà ad affrontare nei prossimi anni è quella della sostenibilità. Potremmo pensare che non sia possibile dare un prezzo alla nostra salute, ma ci sono dei costi che il mercato della sanità deve affrontare. Questa è minacciata da diversi fattori tra i quali:

- la crescita della popolazione mondiale principalmente dovuta ad un'aspettativa di vita maggiore determina un numero maggiore di potenziali pazienti da servire;
- carenza di medici. La Association of American Medical Colleges (AAMC) ha stimato che solo negli Stati Uniti ci sarà carenza di un numero di medici stimato fra i 54.100 e i 139.000 entro il 2033³;
- distribuzione del servizio. L'attuale modello di sanità prevede l'accentramento delle tecnologie nelle strutture ospedaliere costringendo il paziente a spostarsi per usufruire del servizio [42];
- aumento dei costi legati alle tecnologie combinato con la necessità di ridurre il budget assegnato al settore sanitario.

Attualmente, secondo le stime del PwC, il trend dei costi medici è attualmente insostenibile ⁴. La soluzione proposta per questo problema è l'e-health, in particolare la Connected Health, un termine più specifico per indicare un maggiore focus sui fattori di interconnessione dei dispositivi legati alla sanità. I vantaggi di avere dispositivi interconnessi possono essere molteplici: dall'interconnessione del paziente a tutti gli organi collegati ad un determinato corso di cura fino all'utilizzo di dispositivi (anche un'app di uno smartphone) per la prevenzione e la tutela della salute del paziente. Lo scopo di tutto sarebbe quello di adottare un modello On-Demand ponendo il paziente al centro del sistema permettendo più attenzione alle sue necessità riducendo però i costi umani, sociali ed economici.

³<http://www.aamc.org/news-insights/press-releases/new-aamc-report-confirms-growing-physician-shortage>

⁴<http://www.pwc.com/us/en/health-industries/health-research-institute/assets/pdf/hri-behind-the-numbers-2019.pdf>

2.1.1 Consulenza a distanza e telemedicina

Ci sono contesti in cui è impossibile pensare di poter avere fisicamente a disposizione la strumentazione necessaria. L'integrazione della realtà mista in questo contesto potrebbe fornire migliori capacità di espressione visiva aiutando anche attraverso percorsi di cura intrapresi a distanza. Poter intraprendere questi percorsi potrebbe aiutare molto le persone che hanno difficoltà a colmare la distanza fra loro e la struttura medica che eroga il servizio. Si pensi, per esempio, alle persone anziane in lotta contro le sfide della vecchiaia o a situazioni come dover fornire servizi sanitari di qualità in zone rurali o perfino in ambito militare sul campo di battaglia. Utilizzare la realtà mista potrebbe aiutare non solo in quei contesti dove visitare la struttura è difficile, ma potrebbe favorire anche la velocità di intervento (un ulteriore fattore che può fare la differenza fra la vita e la morte di una persona) e aiutare a ridurre i costi dei servizi erogati. La possibilità di poter condividere informazioni e immagini in tutto il mondo istantaneamente facilita il compito degli operatori sul posto che potrebbero ricevere diagnosi più accurate da altri operatori muniti di strumenti più adeguati o tecnologicamente avanzati.

COVID-19

La crisi causata dal COVID-19 ha aumentato questa necessità di digitalizzazione. La necessità di isolamento e riduzione dei contatti ha stimolato settori come quello farmaceutico e di life science a virtualizzare i propri studi clinici. Secondo le stime di PwC, il 38% delle compagnie che operano in questi settori eseguiranno oltre un quarto dei propri studi in maniera virtuale⁵.

2.1.2 Rapporto medico-paziente

È importante per i pazienti comprendere informazioni come la propria prognosi, lo scopo della cura ed essere coinvolti nel trattamento. Gravi problemi di comunicazione possono rivelarsi un ostacolo per il rapporto medico-paziente. La comunicazione medico-paziente si propone tre obiettivi principali [27]:

- creare una buona relazione interpersonale fra le parti;
- semplificare il più possibile lo scambio di informazioni;
- permettere ai pazienti di essere coinvolti nel processo decisionale.

⁵<https://www.pwc.com/us/en/industries/health-industries/top-health-industry-issues.html#clinical-trials>

Perseguire questi risultati favorisce un'efficace comunicazione medico-paziente che può essere fonte di motivazione, supporto e rassicurazione [27]. Alcuni vantaggi legati a questi aspetti possono essere la soddisfazione sul lavoro, la fiducia in se stessi, la motivazione e la visione positiva della propria condizione clinica arrivando a risultati che possono influenzare i loro esiti di salute [27]. La problematica maggiormente riportata dai pazienti verso i medici non riguarda la loro competenza clinica, ma problemi di comunicazione [27].

I recenti sviluppi in ambito di telemedicina hanno portato delle opportunità di assistenza abilitando differenti modalità di rapporto fra medico e paziente come le consulenze a distanza. Nonostante gli studi dimostrino un certo apprezzamento per le comodità offerte dalla telemedicina da parte di pazienti senza grossi problemi di salute, rimangono molti dubbi sulle aspettative che potrebbe avere un paziente in condizioni più gravi, il quale potrebbe trovare meno soddisfacente una visita fatta a distanza piuttosto che in presenza [1]. Se da un lato forse non sarà possibile rimpiazzare l'empatia fornita dal contatto umano, sicuramente la realtà mista può essere considerato uno strumento a disposizione del medico per aiutare i pazienti a comprendere meglio la propria situazione e il proprio percorso di cura.

2.2 L'evoluzione del *medical imaging*

Il *medical imaging* è il contesto principale che accompagna generalmente le ricerche come utilizzo della realtà mista nell'ambito dell'assistenza sanitaria. Essendo scopo di questa tesi fornire un'idea dello stato dell'arte, si vuole fornire alcune informazioni generali circa i contesti in cui probabilmente si vedrà applicata la realtà mista durante l'analisi dettagliata della ricerca. Con il termine *medical imaging* (o diagnostica per immagini) ci si riferisce al generico processo attraverso il quale è possibile osservare un'area del corpo umano non visibile dall'esterno per scopi clinici⁶. Questa pratica permette di avere informazioni circa le ossa, gli organi o i tessuti del paziente senza applicare procedure invasive rendendo le diagnosi più accurate. Il settore del *medical imaging* è probabilmente uno dei più prolifici per quanto riguarda la letteratura riguardante la realtà mista grazie alla possibilità di creare ologrammi 3D dei risultati delle tecniche di imaging.

L'evoluzione del *medical imaging* è stata molto significativa nel corso degli anni. Inizialmente, le immagini mediche venivano prodotte utilizzando metodi radiografici, ma oggi ci sono molte altre tecniche di imaging disponibili. Qui di seguito si elencano alcune delle principali tecnologie che hanno contribuito all'evoluzione del medical imaging.

⁶http://it.wikipedia.org/wiki/Diagnostica_per_immagini

- **Radiografia:** la radiografia è stata la prima tecnologia di imaging medico ad essere sviluppata. Le immagini radiografiche vengono prodotte utilizzando raggi X, che attraversano il corpo umano e vengono registrati su una pellicola fotografica. La radiografia è ancora ampiamente utilizzata per diagnosticare problemi ossei e articolari.
- **Tomografia Computerizzata (CT):** la CT è stata una delle prime tecnologie di imaging a raggi X che ha permesso di ottenere immagini tridimensionali del corpo umano. La TC utilizza una serie di raggi X a bassa dose per produrre immagini dettagliate di organi interni e tessuti molli.
- **Risonanza Magnetica (MRI):** la MRI è una tecnologia di imaging medico che utilizza campi magnetici e onde radio per creare immagini dettagliate degli organi e dei tessuti all'interno del corpo umano. La MRI non utilizza raggi X e quindi non comporta alcun rischio di radiazioni ionizzanti per i pazienti.
- **Ecografia:** l'ecografia utilizza onde sonore ad alta frequenza per produrre immagini del corpo umano. L'ecografia è spesso utilizzata per visualizzare organi come il fegato, la cistifellea e il feto in utero.
- **Tomografia a emissione di positroni (PET):** la tomografia a emissione di positroni utilizza sostanze radioattive per creare immagini del corpo umano. Questo tipo di imaging è particolarmente utile per visualizzare il metabolismo del corpo, ed è spesso utilizzato per diagnosticare il cancro.
- **Tomografia ad emissione di fotoni singoli (SPECT):** la tomografia ad emissione di fotoni singoli è simile alla tomografia a emissione di positroni, ma utilizza un tipo diverso di radiofarmaco per creare immagini del corpo umano. Questo tipo di imaging è spesso utilizzato per diagnosticare malattie cardiache e cerebrovascolari.
- **Imaging molecolare:** l'imaging molecolare consente di visualizzare le interazioni tra le molecole all'interno del corpo umano. Questa tecnologia di imaging viene utilizzata per studiare la struttura e la funzione delle molecole nel corpo umano e per diagnosticare malattie come il cancro.

Inoltre, la combinazione di diverse modalità di imaging (ad esempio PET-CT e MRI-PET) ha permesso di ottenere immagini più dettagliate e precise delle strutture e delle funzioni del corpo.

2.2.1 Confronto tra immagini 2D e 3D

In linea generale, il 3D offre dei vantaggi notevoli grazie alla possibilità di generare immagini più complete e ben dettagliate. È una risorsa soprattutto per le diagnosi e per la chirurgia, dove bastano poche immagini 3D per dare il prospetto generale della situazione. In ambito chirurgico, la possibilità di poter avere a disposizione un modello 3D permette di studiarsi più approfonditamente la situazione davanti ad un computer in fase pre-chirurgica piuttosto che esplorare direttamente in sala operatoria, non solo abbassando i rischi dell'intervento, ma potenzialmente riducendone le tempistiche e, di conseguenza, i costi.

La mancanza della profondità delle immagini 2D sembra essere un ostacolo soprattutto nel campo della formazione dove gli studenti si trovano in difficoltà ad interpretare correttamente le complesse relazioni fra le varie strutture anatomiche [6].

Per quanto riguarda il punto di vista del paziente, uno studio condotto su 126 casi ha dimostrato che l'utilizzo del *medical imaging* può aiutarlo a comprendere, ricordare e a fidarsi delle informazioni mediche ricevute, individuando una preferenza per le immagini 3D [49].

Nonostante il vantaggio teorico del 3D, il 2D viene ancora ampiamente utilizzato perché tuttora offre, in alcuni campi come la radiologia, una miglior risoluzione immagine ad un costo inferiore.

2.2.2 La Realtà mista nel medical imaging

L'utilizzo della realtà mista in ambito medico è subordinato alla soluzione delle sfide principali legate allo stato della tecnica della stessa.

Mentre per quanto riguarda la realtà mista in generale il *tracking* è il collo di bottiglia di sviluppo, in un contesto come quello medico, spesso svolto in ambiente chiusi e che possono essere studiati appositamente per accogliere questi sistemi, la sfida principale sembra essere quella della registrazione dei modelli raccolti direttamente sul paziente. Infatti, molti degli algoritmi sviluppati per i processi di registrazione funzionano per oggetti statici e risultano sufficientemente accurati spesso solo per i tessuti rigidi, come le ossa [18]. Il processo di registrazione diventa molto più complicato per i tessuti che possono presentare deformazioni in corso d'opera sia per la complessità del sistema sia per la qualità delle immagini raccolte. Soprattutto in sala operatoria, elementi come il battito cardiaco, le ventilazioni e le insufflazioni laparoscopiche possono deformare gli organi e complicare il processo di registrazione [3].

Fusione di immagini provenienti da modalità diverse in un'unica vista

Come descritto nella sezione 2.2, esistono diverse modalità di rilevamento immagini, ognuna delle quali può avere diversi scopi e vantaggi. Visualizzarle direttamente sul corpo del paziente semplificherebbe l'analisi, ma un passo ulteriore è quello di fondere tra loro due o più immagini per completare l'informazione. La possibilità di avere un modello più completo semplificherebbe il lavoro anche in sala operatoria dove si potrebbero ridurre il numero di immagini necessarie al chirurgo per operare rendendo l'ambiente meno dispersivo.

Monitor non fisici

Può succedere che lo spazio fisico limiti le soluzioni possibili anche nell'allestimento di una sala operatoria. Uno studio svolto nell'università di Birjand [69] ha analizzato diversi fattori, tra cui lo spazio fisico disponibile in sala operatoria, mostrando come questo possa essere correlato con la sanità generale. La possibilità di utilizzare l'intero ambiente come monitor permetterebbe sia di risparmiare spazio, sia consentirebbe agli esperti di personalizzare il proprio ambiente in base alla comodità e alle necessità del caso.

Interazione e visualizzazione 3D

I display sono una parte importante nel mondo delle immagini 3D. La maggior parte dei display permette di vedere comunque immagini 2D simulando, nel migliore dei casi, il 3D attraverso modellazioni semplici dell'immagine. Con l'introduzione della realtà mista non si è più limitati al 2D, ma si ha accesso alla possibilità di vedere modelli 3D con i relativi vantaggi del caso (vedi sezione 2.2.1). La possibilità di ingrandire e modificare nello spazio queste ricostruzioni può facilitare il compito di diagnosi e studio del trattamento nonché l'insegnamento. Inoltre, la realtà mista permetterebbe la possibilità di gestire annotazioni relative a questi modelli direttamente su di essi.

Stampa 3D

La stampa di un modello 3D è utilizzata in molti campi della medicina per creare dei prodotti più adeguati all'unicità di ogni paziente. Questa unicità rende poco sostenibile adottare questo modello su larga scala in termini di costo e tempo. La possibilità di utilizzare modelli 3D virtuali, invece di vere stampe, porterebbe i vantaggi della digitalizzazione anche in questi campi dove è richiesta una ricostruzione del paziente.

2.3 Applicazioni pratiche di XR già utilizzate in campo medico

Con gli esempi seguenti si vuole fornire un'idea di quello che è e potrebbe a breve essere disponibile in commercio nel campo della realtà aumentata. Negli esempi che seguono è stata inclusa la realtà virtuale perché attualmente ha preso molto più piede grazie alla minor complessità richiesta dalla tecnologia, ma, ai fini di questo capitolo, è comunque un indicatore di dove si sta puntando l'attenzione.

HoloLens x healthcare

HoloLens⁷ è un visore per realtà aumentata/mista sviluppato da Microsoft. HoloLens propone diverse tecnologie nel campo healthcare, alcune delle quali sono: *Dynamics 365 Remote Assist*, *ApoQlar VSI HoloMedicinet* e *GigXR HoloPatient*. *Dynamics 365 Remote Assist* è un servizio multi-utente per chiamate o meeting per la condivisione in tempo reale del tuo ambiente. *ApoQlar VSI HoloMedicinet* è un servizio per la formazione medica e l'apprendimento mediante simulazioni in realtà mista. *GigXR HoloPatient* è un'applicazione per aiutare lo studio e le diagnosi di ologrammi 3D di simulazioni e casi di studio dei pazienti. Vengono riportati alcuni dati provenienti da una ricerca⁸, effettuata da Forrester Consulting, commissionata da Microsoft stessa per indagare sui benefici che stanno avendo i propri clienti circa l'uso della realtà mista (in particolare sui servizi sopraccitati). Le 23 industrie intervistate nella ricerca sono distribuite principalmente nei campi: di produzione, AEC (architettura, ingegneria e costruzione), assistenza sanitaria e formazione. Per quanto riguarda l'assistenza sanitaria, i dati più interessanti raccolti mostrano che:

- l'apprendimento effettuato tramite realtà mista richiede il 30% del tempo in meno rispetto ai metodi tradizionali.
- sul luogo di lavoro è chiesto fino al 75% in meno di dispositivi di protezione individuale.

VisAR

Novarad Corporation, una compagnia degli Stati Uniti che lavora nel campo del *medical imaging*, ha iniziato nel 2022 una campagna di distribuzione del suo prodotto: VisAR. VisAR è la nuova tecnologia brevettata che permette di

⁷<https://www.microsoft.com/hololens>

⁸<https://tools.totaleconomicimpact.com/go/microsoft/HoloLens2/>



Figura 2.1: *Realtà mista attraverso HoloLens* - © Microsoft

registrare gli ologrammi 3D anatomici dei pazienti direttamente su di loro con un'incredibile precisione allo scopo di aiutare le operazioni chirurgiche⁹.

Robot Da Vinci

Il sistema Da Vinci è utilizzato per la chirurgia mininvasiva robot-assistita e permette al chirurgo di stare fisicamente fuori dal campo operatorio operando tramite comandi e monitor. Il sistema si compone di diversi elementi tra i quali:

- **carrello paziente:** composto da 4 bracci che reggono gli strumenti e l'endoscopio. Questi sono i bracci che materialmente svolgono l'operazione;
- **carrello visione:** contiene l'unità principale di elaborazione e un sistema video ad alta definizione. Contiene un monitor utilizzabile dal tema infermieristico;
- **console Chirurgica:** dalla quale il chirurgo gestisce gli strumenti.

⁹<https://www.immersivelearning.news/2022/09/11/novarad-announces-strategic-alliance-with-network-of-neurosurgical-and-spine-distribution-partners-across-the-us/>



Figura 2.2: Immagini delle viste realizzate con il sistema robot Da Vinci. Vista del sistema di visione principale (A) [59]

Questo robot è utilizzato in urologia, ginecologia, chirurgia generale, chirurgia toracica, chirurgia pediatrica, ORL e senologia¹⁰.

Il primo ospedale nel metaverso

Benché il metaverso non sia ancora alla portata di tutti, il gruppo Thumbay, un conglomerato commerciale internazionale con sede ad Ajman, negli Emirati Arabi Uniti, ha dichiarato di star lavorando ad un progetto che vedrà la prima realizzazione di un'ospedale nel metaverso. Questo ospedale virtuale sarà visitabile dai pazienti utilizzando i propri avatar per fornire contemporaneamente esperienze interattive ed immersive¹¹.

2.4 Metodologia di analisi della letteratura

La tesi mira ad individuare lo stato della letteratura sia da un lato qualitativo che quantitativo. In particolare si cerca di estrapolare dai testi quattro temi principali:

- **1:** qual è il caso di studio del testo analizzato;
- **2:** come viene utilizzata la realtà mista nel testo analizzato;
- **3:** problematiche riscontrate legate alla realtà mista;
- **4:** conclusioni correlate alla e prospettive future.

2.4.1 Contrasti nelle definizioni di AR e MR

Nel corso dell'analisi della letteratura e nella ricerca delle fonti sono emerse alcune difficoltà legate alla definizione di realtà aumentata e di realtà mista. Il

¹⁰<https://www.abmedica.it/robotica/da-vinci>

¹¹<https://www.cryptotimes.io/uae-inaugurates-the-first-metaverse-hospital/>

termine risulta essere ancora più storpiato nell'industria dove a volte si intende per realtà mista anche quella solamente virtuale. Un altro problema legato alla realtà mista è che è un concetto che ha preso piede più recentemente rispetto alla realtà aumentata e non è scontato che i testi più vecchi la nominino. Tenendo conto che questa tesi propone come definizione di realtà mista l'insieme di AR e AV proposta da Milgram, si è deciso di tenere tutti i testi che ritenessero il loro studio coerente con la loro idea di AR, AV o MR ovvero senza aggiungere un filtro personale dell'autore di questa tesi. Sono comunque stati esclusi tutti i testi trattanti di sola realtà virtuale.

2.4.2 Criteri di ricerca e selezione finale

I testi sono stati estratti da Scopus usando come query di ricerca (*TITLE-ABS-KEY (mixed AND reality) AND TITLE-ABS-KEY (ehealth OR medicine OR healthcare)*) vale a dire che i testi dovevano contenere entrambe le parole 'mixed' e 'reality' e almeno una tra 'healthcare', 'medicine' e 'ehealth' nel titolo, nell'abstract o nelle parole chiave. Per definire quali articoli erano più rilevanti per la comunità scientifica, si è deciso di valutare solo i testi che avessero ricevuto almeno 10 citazioni. L'idea iniziale di introdurre il limite delle 10 citazioni era un modo per ridurre i testi da consultare guidata dal concetto che più un testo è citato, più ha mosso interesse (o creato valore) all'interno della comunità scientifica. La figura 2.3 riporta lo schema riassuntivo della raccolta del materiale utilizzato per questa tesi.

Il filtro applicato ha prodotto un risultato di 156 testi.

Dei 156 testi sono stati esclusi tutti i testi che non trattavano di XR in campo medico portando il nuovo numero a 88.

Degli 88 testi sono stati esclusi i testi che trattavano unicamente di realtà virtuale e le riviste che avessero un indice qualità di Q3 o Q4 su *SCImago Journal & Country Rank*¹² e altre riviste non ritenute idonee con indice non inferiore a Q2. Il numero finale dei testi analizzati è stato di 50.

2.4.3 Pre-analisi dei risultati

Una prima analisi della letteratura trovata viene fornita dal punto di vista quantitativo. La figura 2.4 rappresenta la distribuzione della letteratura trovata negli anni. La figura 2.5 rappresenta il numero di citazioni della letteratura trovata.

Da queste distribuzioni si può supporre l'interesse crescente degli ultimi anni nel campo della realtà mista.

¹²<https://www.scimagojr.com/>

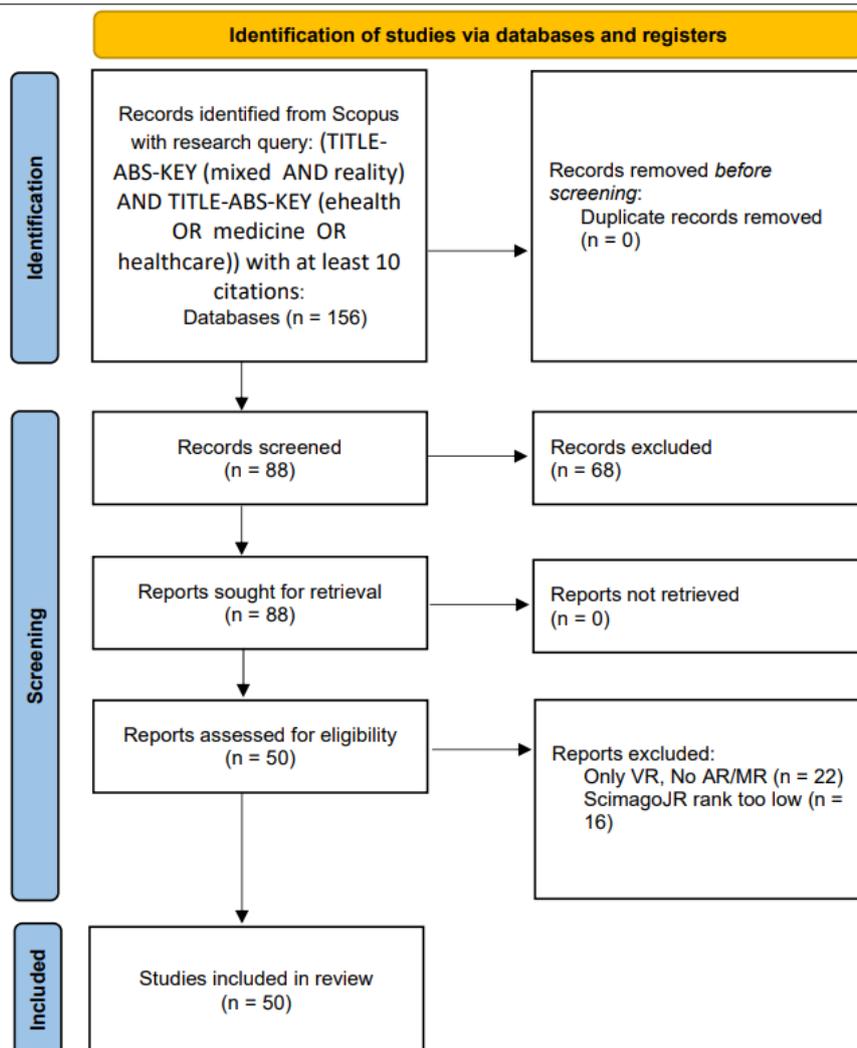


Figura 2.3: Schema di raccolta e filtraggio dei testi

Dalla letteratura sono stati estrapolati i temi principali utilizzando le parole chiave fornite dagli autori. In particolare vengono trovati tre temi principali: formazione, chirurgia e tecniche di imaging. Lo scopo di tale ricerca è stato quello di dividere la letteratura per la presentazione. Essendo l'imaging parallelo a tutti i campi si è deciso di non trattarlo direttamente e di dividere il resto della letteratura in "psicoterapia e riabilitazione psicologica" e "terapia e riabilitazione fisica".

Dalla figura 2.6 si può notare come il tema della formazione sia da sempre una delle più interessanti applicazioni della realtà mista nel campo healthcare, ma anche l'aumento dell'interesse in campo chirurgico negli ultimi anni.

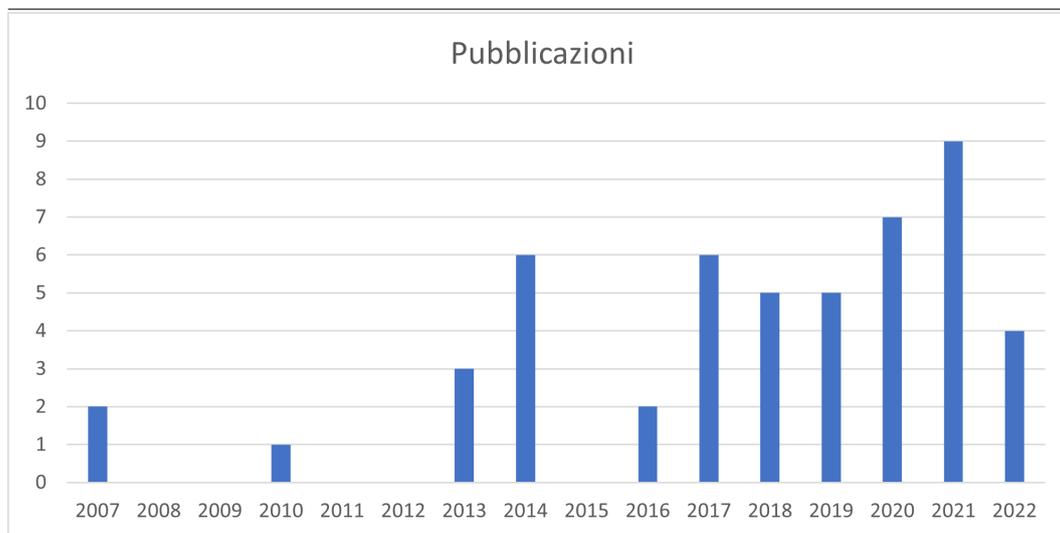


Figura 2.4: *Distribuzione negli anni delle pubblicazioni trovate*

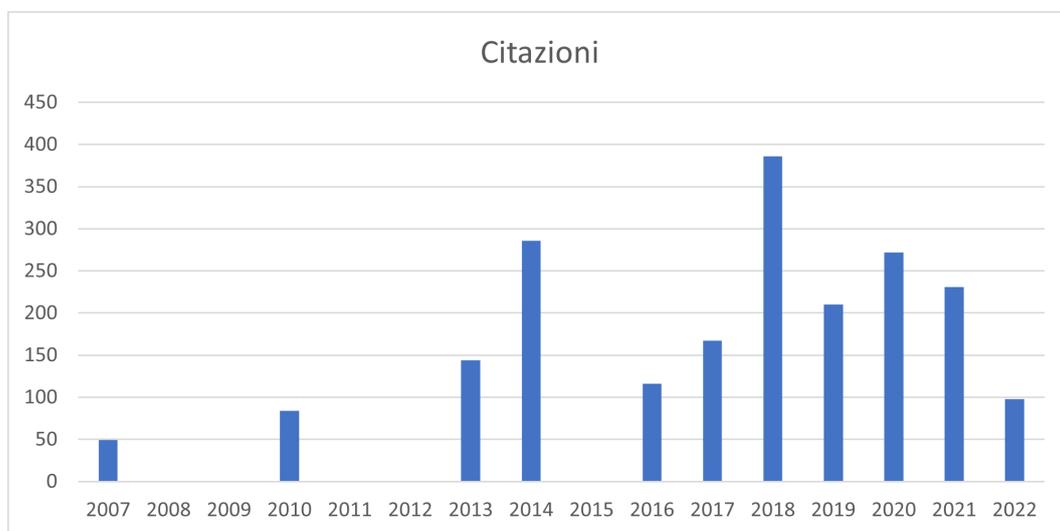


Figura 2.5: *Distribuzione negli anni delle citazioni delle pubblicazioni trovate*

È importante notare che essendo questo un testo di inizio 2023, è normale avere poche pubblicazioni dell'anno 2022 con almeno 10 citazioni, ma questo non deve essere interpretato come un calo di interesse nel campo.

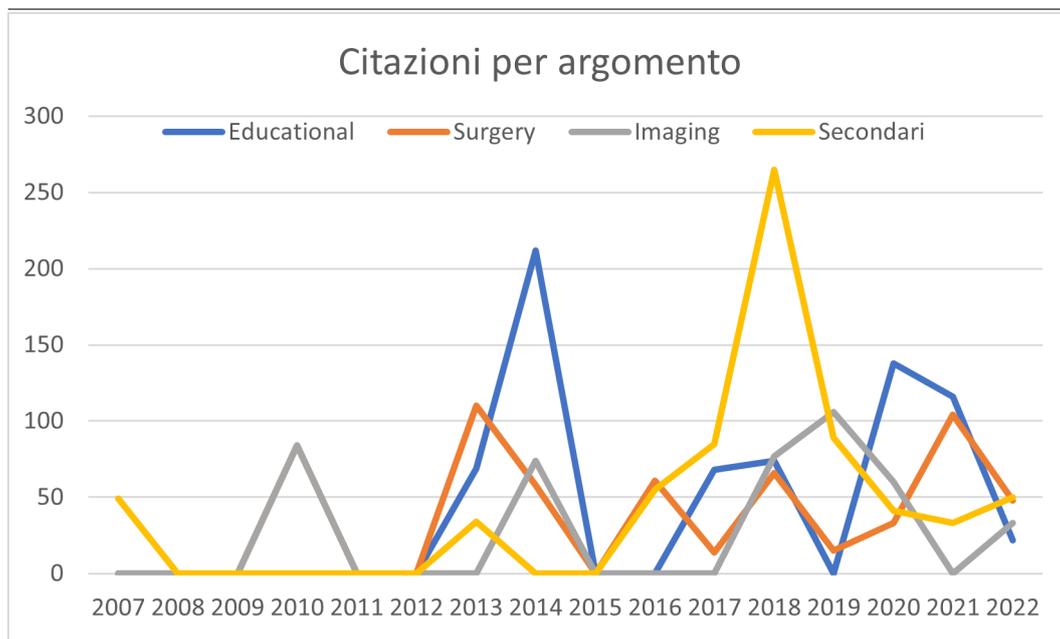


Figura 2.6: Andamento dei 3 temi principali: "formazione", "chirurgia" e "imaging". Il tema numero 4 "secondari" rappresenta l'andamento delle pubblicazioni le cui parole chiave non rientrano nei primi 3 contesti.

Capitolo 3

Applicazioni della MR nel contesto healthcare e prospettive future

3.1 Formazione e apprendimento

In generale, la realtà mista viene utilizzata principalmente per creare simulazioni di eventi reali per imparare a valutare questi eventi, ad esempio riconoscere un ictus [39], o per ricostruire delle situazioni reali dove sono necessari mezzi operativi particolarmente costosi [60]. In alcuni casi si intende virtualizzare l'ambiente e introdurre in questo oggetti reali [60]. L'utilizzo di simulazioni chirurgiche di interventi agli occhi nelle università mediche che trattano di oftalmologia degli Stati Uniti è cresciuto dal 23% nel 2010 al 73% nel 2018 e la realtà mista è ritenuta, per quanto riguarda l'apprendimento in campo oftalmico, uno strumento valido [48]. La realtà mista nella formazione permette di apprendere procedimenti che normalmente non sarebbe stato possibile apprendere. Robinson et al [52] riporta come la realtà mista permette di visualizzare l'anatomia interna non osservabile con la normale procedura SCVA (subclavin central venous access) e inoltre permette di provare l'intera procedura invece che provare solo piccole attività mentre si è supervisionati. Le simulazioni in apprendimento riscontrano diversi vantaggi:

- poter effettuare ripetutamente differenti simulazioni che non hanno effetti reali sui pazienti;
- poter simulare aiuta a livello finanziario, etico e di supervisione rispetto ai metodi tradizionali come cadaveri o altri equipaggiamenti da laboratorio [7];

Sono presenti alcuni contesti dove la realtà mista applicata è stata applicata ad un MRH (mixed reality human) per facilitare la pratica in assenza di disponibilità fisica dei membri del team [40]. In apprendimento sono apprezzati particolarmente anche i display tattili. Yudkowsky et Al [72] hanno utilizzato la realtà aumentata usata per fare pratica in chirurgia di un intervento di ventricolostomia avvalendosi visivamente di scansioni tomografiche del cervello con l'aggiunta di uno stilo come display tattile per simulare l'inserimento del catetere. In molti contesti, come quello presentato da Javaux et al [34], prima dell'introduzione della realtà aumentata, gli allievi potevano allenare le abilità laparoscopiche unicamente attraverso simulatori organici e inorganici che permettessero un'esperienza a livello tattile. Con l'aggiunta della realtà virtuale però si ha anche un feedback oggettivo e l'anatomia simulata crea un ambiente in realtà mista ottenendo il meglio sia per la parte visiva sia tattile.

3.1.1 Problemi riscontrati

Molte limitazioni delle simulazioni dipendono dalla disponibilità di un singolo modello anatomico [52]. In aggiunta risulta difficile valutare l'impatto economico che avrebbe un diverso numero dal momento che alcuni studi tendono ad ignorare nelle proprie valutazioni il costo di sviluppo dei modelli e dei test delle simulazioni [7]. Sebbene la qualità delle immagini sembri non essere un punto chiave per i modelli utilizzati in allenamento, che raggiungono un buon grado di usabilità anche quando non vengono forniti in alta qualità [34], nel caso di applicazioni che si basano sul senso di presenza, la bassa qualità di animazioni e audio possono rendere lo scenario irrealistico [40].

Un'altra criticità riguarda i dispositivi HMD utilizzati. le interfacce di input possono non rivelarsi adeguate e rendere le interazioni con gli elementi goffe e poco intuitive [60].

Per quanto riguarda le interfacce tattili, la precisione del simulatore può rilevarsi importante. In particolare, si segnala come esempio l'esperienza di Yudkowsky et al [72] dove la mancanza di un passaggio nel simulatore proposto ha creato una tendenza ad un inserimento più profondo del catetere (lo stilo usato come display tattile durante l'operazione). Azione che potrebbe causare emorragia quando inserito realmente. Molti dei metodi rivolti all'insegnamento che sono stati analizzati fanno uso di manichini per avere un supporto tattile sul quale viene sovrainposto un ologramma ai fini di cambiarne le proprietà visive. In questi casi le maggiori difficoltà segnalate sono in termini di registrazione [35], spesso fatta manualmente, e riconoscimento degli oggetti[39].

La mancanza di validità degli studi e di omogeneità nei progetti di ricerca rendono difficile la trasferibilità delle scoperte in studi per creare una

conoscenza di base da renderla rilevante nella pratica [22].

3.1.2 Prospettive future

Le simulazioni studiate hanno valutato in generale molto realistica la propria esperienza ed ottenuto dei risultati notevoli. La maggior parte degli studi ha considerato gli interventi in XR almeno non inferiori ai tradizionali metodi di insegnamento. L'uso della MR sembra migliorare in particolare i processi di educazione, nello specifico riguardo le conoscenze anatomiche e tecniche per l'inserimento degli aghi.

La simulazione delle espressioni facciali viene semplificata dall'utilizzo della realtà aumentata favorendo l'apprendimento di tecniche di riconoscimento di sintomi come quelli dell'ictus [39].

L'ambiente di lavoro risulta essere un altro punto di interesse. Infatti, gli ambienti creati digitalmente possono risultare più sicuri in una sala operatoria frenetica [40].

L'AR abilita anche nuove forme di tutoraggio telematico, permettendo al mentore di vedere quello che vede l'operatore e mostrare i suoi consigli direttamente dentro la visuale dell'operatore [29].

Le sfide future si sviluppano su più fronti come accogliere più di un utente nella simulazioni, riuscire ad integrare gli elementi fisici della simulazione nell'ambiente virtuale in modo più convincente [60] o scegliere fra diversi livelli di difficoltà per l'allenamento [34].

Nell'ottica di fornire linee guida alle applicazioni MR di formazione servono più studi comparativi per capire quale metodo sia migliore [73], ma queste ricerche hanno bisogno di standard per ottenere una conoscenza di base ed è necessario impostare degli obiettivi raggiungibili [22].

3.2 Chirurgia

La realtà mista applicata alla chirurgia può aiutare sia in fase pre-operatoria di analisi e diagnosi sia in sala operatoria. In fase di analisi la realtà mista può avvalersi di tutte le tecniche di medical imaging per ricostruire organi 3D. Questo metodo può rivelarsi migliore e meno costoso rispetto alle stampe 3D se non serve un modello fisico [10]. Più ricostruzioni possono essere fuse in un unico modello 3D per facilitare questi processi di diagnostica permettendo di avere un'idea di come è fatto l'interno del paziente prima di operarlo [46]. Questi modelli 3D sono utilizzati anche per stabilire il punto di accesso di aghi e guidarne il percorso [50]. La realtà mista si rivela anche un'alternativa efficace alla chirurgia microscopica [48]: le immagini 3D vengono registrate sul

corpo del paziente con lo scopo di individuare i corpi radioattivi e fluorescenti riducendo al minimo gli approcci invasivi [47]. In sala operatoria i potenziali effetti benefici per il chirurgo sono molti. Le immagini sovrapposte al campo operatorio riducono lo spostamento dell'attenzione dal paziente, velocizzano la procedura grazie alla navigazione processata dal computer diminuendo le esposizione a radiazioni [43] e rendono più semplice al chirurgo rimanere completamente sterile [25]. Le immagini 3D sovrapposte al corpo vengono utilizzate come guida per la navigazione chirurgica e fanno spesso uso di marker piazzati sul corpo del paziente come ancore di riferimento per la loro registrazione. Come alternativa, Sugimoto et al [62] utilizzano parti anatomiche facilmente riconoscibili come i capezzoli e l'ombelico come punto di fissaggio anatomico. La sovrapposizione di queste immagini può essere accompagnata da algoritmi di intelligenza artificiale per favorire una navigazione accurata in tempo reale, teoricamente senza fare uso della fluoroscopia [26]. Questo sistema è già applicato in una gamma di procedure chirurgiche minimamente invasive e permette di ridurre il tempo di esposizione del paziente alle radiazioni rispetto alla sola fluoroscopia [26]. La navigazione chirurgica tramite AR si è rivelata particolarmente efficace soprattutto nella pratica di Augmented reality-mediated spine surgery (ARMSS) per aumentare la precisione, accuratezza e sicurezza dei metodi convenzionali di inserimento di viti peduncolari percutanee [43].

Alcune tecniche di realtà aumentata sono state implementate nella macchina Da Vinci in ambito chirurgico. In questo contesto il medico era in grado di scambiare la visuale reale con una mista [64].

La tecnologia XR permette anche un maggior coinvolgimento del paziente nell'operazione favorendo una riduzione dello stress e ansia [56].

3.2.1 Problemi riscontrati

I problemi riscontrati sono dovuti principalmente ai modelli utilizzati e ai limiti tecnologici dei dispositivi utilizzati. Per quanto riguarda i primi, per ottenere dei modelli efficaci è spesso necessario integrare più tecniche di imaging [10] o avere accesso ad alcune tecnologie difficili da reperire. Ad esempio, è necessaria una scansione TC a quattro fasi per ottenere immagini HA3D e la tecnologia HA3D è disponibile in pochi centri e richiede specifiche competenze [50]. Esiste comunque il rischio che utilizzando modelli olografici 3D in cui si può modificare la scala si possa perdere la comprensione effettiva della reale misura da operare [10].

L'uso degli HMD può risultare poco confortevole a causa del peso o dell'intralcio dovuto ai fili [44], può creare mal di testa e vertigini e non toglie del tutto il problema della perdita di attenzione dal paziente pur risolvendolo in parte [43]. Inoltre, la curva di apprendimento per utilizzare questi dispositivi

risulta elevata [23]. Le funzioni più critiche che questi dispositivi si trovano ad affrontare sono comunque tracking e registration. Il tracking sembra essere ostacolato dalle caratteristiche intrinseche dei tessuti come lucidità e la riflettanza [11]. Il processo di registration sembra essere il punto critico maggiore e, in determinati casi, il posizionamento del modello 3D sul paziente può essere effettuato manualmente utilizzando punti di riferimento come pube, costole e creste iliache [50]. Anche nei casi dove i modelli vengono posizionati manualmente, la visualizzazione del modello virtuale sovrapposta a quella reale del paziente è ancora ritenuta insoddisfacente dalla maggior parte degli studi principalmente a causa della respirazione e deformazione degli organi [50]. Fenomeno che si verifica per i tessuti non rigidi. La navigazione chirurgica è fortemente influenzata dal posizionamento corretto e dalla coerenza dei punti di riferimento piazzati sul corpo del paziente nel corso dell'operazione. Alcuni problemi riguardo alle deformazione dei tessuti molli possono essere parzialmente superati individuando la posizione interessata usando come riferimento i tessuti rigidi, ma la registrazione rimarrà uno dei problemi più grandi del prossimo futuro [47]. Le deformazioni sono causate principalmente da battito cardiaco, ventilazioni e insufflazioni laparoscopiche. Queste deformazioni in generale limitano l'uso dell'AR nel campo della chirurgia [62].

Nella chirurgia telematica la latenza della connessione è un problema da affrontare. Giusto per fornire un'idea, Hamacher et al [29] individuano, nel loro esperimento, una latenza massima di 105ms come limite per non rischiare di deteriorare la prestazione.

3.2.2 Prospettive future

La realtà virtuale è principalmente impiegata fuori dalla sala operatoria dove non c'è necessità di interagire fisicamente con il paziente, mentre sia in sala operatoria sia in fase di valutazione si tende a preferire l'uso della realtà mista. In particolare, il futuro della realtà mista in chirurgia sembra brillante soprattutto per la facile integrazione che ha con le altre tecnologie [23]. Se, come si afferma, il divario tra la ricerca e la sua applicazione è principalmente una questione di costi [25], si suppone che questo sia un divario che sta per essere colmato o comunque lo sarà nel prossimo futuro. Futuri miglioramenti includono la fusione dei dati provenienti da tecnologie diverse al fine di fornire modelli anatomici sempre più completi [10]. L'utilizzo della realtà mista con un HMD sembra essere una procedura clinicamente accurata senza tanti degli svantaggi impliciti nelle procedure tradizionali [43] e fornisce il potenziale di diminuire il rischio delle operazioni riuscendo a ridurre il tempo speso nelle sale operatorie [29].

Tracking e registration sono i problemi maggiormente denunciati. Possono essere utilizzati dei marker piazzati sul corpo come ancore per creare punti di riferimento per la registration, ma il problema della deformazione dei tessuti molli è ancora non risolto. Il tempo speso a calibrare il dispositivo deve essere il minore possibile per permettere al medico di lavorare [8]. La qualità del lavoro svolto dai medici è legata all'usabilità della tecnologia. Una possibile previsione è che fra qualche anno i chirurghi indosseranno occhiali AR sia in sala operatoria che in fase di consultazione e potrebbero ricevere corsi di formazione intensiva per utilizzare questi dispositivi [23]. È fondamentale per chi sviluppa applicazioni AR tenere conto del metodo di lavoro e l'ambiente dell'utente finale e quindi coinvolgerlo fin da subito nello sviluppo [8].

Porpiglia et al [50], in un testo del 2022, riportano probabilmente il primo caso pratico dove sono stati utilizzati ologrammi per la navigazioni chirurgica in specifiche fasi della procedura di puntura renale percutanea comparandoli coi risultati tradizionali. Vengono riportati separatamente i loro risultati. Il tempo medio delle esposizione alle radizioni del paziente trattato con la MR è stato di 120min contro i 262min della pratica normale (media calcolata su gruppi con casi simili). Il gruppo MR ha avuto un tempo medio di puntura più lungo, ma ha avuto un maggiore accordo fra le analisi pre-operatorie e la fase operatoria permettendo di compiere la manovra di puntura sempre correttamente al primo tentativo. L'utilizzo della MR nella navigazione durante la puntura percutanea sembra usabile e sicura. La sovrapposizione dei modelli al paziente è stata effettuata a mano e alcuni sviluppi futuri suggeriscono l'automazione di questo processo. Un metodo potrebbe essere quello di utilizzare dei marker esterni come codici QR o tabelle IR per sovrapporre i modelli 3D sulle parti anatomiche usando come ancore le costole e l'ileo. In aggiunta, si potrebbe fare uso dell'intelligenza artificiale e deep learning per riconoscere la posizione del paziente [50]. Si auspica che i risultati ottenuti da questa esperienza fungano come incentivo per effettuare nuovi test in tutti gli altri campi.

3.3 Psicoterapia e riabilitazione psicologica

La realtà estesa permette ai ricercatori di poter studiare il comportamento umano ricreando, in ambienti ben controllati, situazioni complesse o stimoli. Alcune ricerche intendono avvantaggiarsi del forte coinvolgimento emotivo e potenziale rappresentativo di queste tecnologie come mezzo per supportare percorsi di cambiamento personale [51]. La realtà virtuale è utilizzata nella ricerca psicologica da circa una decina d'anni [14], ma la possibilità di simulare contesti virtuali nei luoghi reali in cui un soggetto riscontra le proprie difficoltà

facilita il trasferimento delle competenze nel mondo reale [51]. Il vantaggio degli elementi virtuali sono diversi. Per i pazienti, vi è la possibilità di lavorare in un ambiente coinvolgente e sicuro e, per gli operatori, vi è la possibilità di fornire una varietà di stimoli controllati e misurarne gli effetti sull'utente [3]. Un ulteriore vantaggio è legato all'esplorare mondi virtuali. Attraverso l'esplorazione si cerca di stimolare la curiosità e l'apertura per rafforzare positivamente le esperienze dell'utente [28]. È interessante capire quali effetti dell'esperienza in realtà mista immersiva può avere sullo stato d'animo, senso di benessere e *future thinking* (mentalità orientata al futuro). Per capirlo, Habak et al [28] hanno sfruttato un ambiente, creato da una collaborazione arte-scienza volto specificatamente per far leva sulle caratteristiche della memoria e del future thinking, chiamato "Edge of the Present" (EOTP). Per aumentare il senso di "presenza" dell'utente è possibile creare ambienti virtuali dotati di oggetti reali che altrimenti sarebbero difficili da simulare. La forte empatia che è possibile stimolare attraverso queste immersioni rende possibile sensibilizzare le persone riguardo a temi più complessi come, ad esempio, Kors et al [37] hanno sviluppato un gioco in virtualità aumentata per insegnare i diritti umani attraverso l'immedesimazione del "viaggio della speranza" di un profugo.

La consapevolezza di sé (*mindfulness*) è considerata importante nel contesto del benessere soggettivo di un individuo. Determinare se le attuali tecnologie XR supportano i requisiti della *mindfulness* e come facilitano gli stati della consapevolezza di sé è stato oggetto di studio da parte di Döllinger et al [16]. La qualità più importante della XR in campo *mindfulness* è la capacità di immersione. Non viene specificato spesso il modo, ma alcune caratteristiche apprezzate sono: capacità di escludere distrazioni esterne e la vivacità degli ambienti virtuali (caratteristiche più legate al VR). Gli ambienti virtuali usati sono spesso ispirati alla natura o strutture astratte per fornire senso di calma [16].

Ci sono utilizzi anche per quanto riguarda la riabilitazione psicologica. Sono state sviluppate delle applicazioni che prendono spunto dagli approcci terapeutici esistenti per i trattamenti di perdita di memoria [3]. Ad esempio, si sviluppano applicazioni in realtà mista con l'obiettivo di riuscire a stimolare la memoria a breve termine e la memoria spaziale per ritardare o ridurre il decadimento dovuto alla malattia di Alzheimer [3]. Una strada presa in questo campo riguarda lo sviluppo di applicazioni in grado di fornire feedback audio visivi per aiutare i pazienti ad autogestirsi durante la riabilitazione [15].

3.3.1 L'importanza della percezione nel contesto

L'introduzione della realtà mista in un ambito psicologico merita qualche riflessione. La percezione del paziente è una variabile aggiuntiva nel determi-

nare gli esiti della realtà mista in questo settore [65]. In un contesto generico, si potrebbe pensare di introdurre un ologramma digitale di un interruttore in una stanza con lo scopo di accendere e spegnere una luce. Il conseguimento dell'obiettivo in questo caso è legato alla capacità dell'utente di interagire con l'interruttore per accendere/spegnere la luce e non dal fatto che l'utente possa percepire o meno l'interruttore come oggetto reale. In un contesto di psicoterapia, quando si cerca di ricreare certi stimoli, il modo in cui il partecipante percepisce gli elementi lo porta talvolta ad agire conseguentemente [65]. Nei contesti più orientati a ricreare ambienti virtuali (VR) le esperienze emotive dei partecipanti sono legate alla convinzione di trovarsi in un ambiente VR [14].

3.3.2 Problemi riscontrati

Normalmente le simulazioni sono tutte in VR ed offrono un livello limitato di "senso di presenza" supportato solo dall'ambiente. La MR permette anche di interagire con l'ambiente creando un senso di operare nell'ambiente reale, migliorando drasticamente questa sensazione [28]. Mentre la VR è molto studiata, la MR è ancora poco analizzata dalla letteratura nonostante le possibilità che offre. Ci sono pochi studi che si concentrano sulle interazioni fisiche fra utente e ambiente. La tecnologia XR che permettono di interagire con l'ambiente e di avere feedback fisici del proprio corpo non sono attualmente adeguatamente sfruttate nonostante sia enfatizzata dalla letteratura l'importanza che questi hanno [16]. La maggior parte delle applicazioni VR usa dei joystick per interagire con l'ambiente virtuale, ma questa forma di input sembra confondere le persone più anziane [3]. Nei casi in realtà mista, sembra più accessibile un sistema di input di tipo gesticolare (ad esempio premi e rilascia con l'indice) e, viste le difficoltà delle persone più anziane, anche vocale [3]. La possibilità di poter interpretare la direzione dello sguardo dell'utente sembra essere un buon meccanismo di selezione all'interno dell'ambiente [3].

Nel complesso risulta difficile validare i risultati. È difficile valutare la relazione che c'è fra un miglioramento all'interno delle applicazioni e il percorso di guarigione sul lungo periodo, essendo difficile valutare quanto miglioramento sia necessario affinché risulti rilevante per il recupero [15]. Inoltre, viene messo in dubbio il valore del tempo impiegato per intraprendere un'abilità come misurazione valida del risultato a causa della possibile perdita di precisione a fronte dell'aumento della velocità [53].

3.3.3 Prospettive future

In generale, gli studi rilevano un miglioramento positivo dello stato d'animo dei partecipanti creando ragione di ritenere gli interventi come potenzialmente

benefici e un'opportunità di fornire nuove forme di prevenzione e trattamenti. Ad esempio, da alcuni risultati ottenuti si ipotizza che includendo la MR negli esercizi cognitivi si possa migliorare anche il lato emozionale del paziente: autostima, resistenza alla frustrazione e fiducia in se stessi [3]. Un modo per stimolare le emozioni potrebbe essere il coinvolgimento. A questo proposito servirebbero tecnologie sempre più immersive [37]. Le persone a contatto con un ambiente adeguatamente immersivo possono arrivare a reagire per emozioni piuttosto che con la logica dimostrando in alcuni casi che la tecnologia immersiva è in grado di far riconoscere emozioni complesse come la solitudine e l'insignificanza [37]. La questione dell'immersività è collegata anche alla concentrazione che in alcuni casi potrebbe essere favorita anche dall'eliminazione di elementi reali dall'ambiente. In quest'ottica la realtà mista potrebbe non aggiungere elementi, ma rimuovere quelli distraenti presenti nell'ambiente reale di analisi.

Lo stato della ricerca sui benefici della realtà mista per affrontare le componenti di disturbi specifici come la depressione e il suicidio è ad uno stato embrionale ed è necessario indagare più a fondo soprattutto per quanto riguarda gli effetti nel tempo di queste esperienze [3].

Sviluppi futuri dovrebbero favorire la realtà mista in questo contesto come uno strumento maggiormente accessibile per persone che hanno riscontrato esperienze di disagi o malattie mentali [28].

3.4 Terapia e riabilitazione fisica

In fase di diagnostica, la realtà mista è utilizzata come tecnica di visualizzazione dei modelli 3D raccolti principalmente per la comprensione delle cardiopatie congenite [24], disordini muscolo-scheletrici [30] e analisi pre-operatorie. I modelli 3D virtuali hanno l'inestimabile pregio di non deteriorarsi nel tempo. Recentemente la possibilità di creare ologrammi permette di operare senza utilizzare HMD [24].

In tema di riabilitazione, i testi analizzati trattano principalmente di realtà mista in congiunzione a terapie convenzionali nell'ambito della fisioterapia per riabilitazioni motorie e cognitive che con il loro utilizzo hanno mostrato migliori risultati rispetto ai tradizionali esercizi ripetuti. I vantaggi che l'AR offre sono un migliore orientamento dell'esercizio e che permette al fisioterapista di valutare i dati analizzati tramite AR [63]. Alcuni usi della realtà mista in questo contesto sono: prestazioni fisiche, trattamenti di equilibrio e prevenzione delle cadute in geriatria, funzionalità della parte bassa e alta degli arti dopo gli ictus, per trattare la sindrome del dolore fantasma e per la congelazione del movimento nel parkinson [63].

3.4.1 Problemi riscontrati

L'accertamento dell'utilità fornita dalle tecnologie XR in campo terapeutico è limitato. Il numero di studi risulta ridotto e alcuni sono di scarsa qualità. Pochi studi forniscono un livello accertamento di evidenza OCEBM (La medicina basata sulle prove di efficacia) 1b (Evidenza ottenuta da almeno un trial controllato, ben progettato, con randomizzazione) [48]. Inoltre non c'è omogeneità negli strumenti o nei metodi usati [53] [63]. Quindi in alcuni casi non è possibile comparare i casi statisticamente [63].

In fase di diagnosi, la qualità dei modelli virtuali è a volte inferiore a quella che si avrebbe con una replica fisica [24].

Durante la telemedicina, l'ambiente creato deve essere confortevole e privo di distrazioni. Il medico deve essere consapevole dei punti di forza e dei limiti della tecnologia utilizzata [30]. In particolare percepire elementi provenienti da un realtà diversa sembra essere percepito come un carico di lavoro maggiore da parte degli utenti [67].

3.4.2 Prospettive future

In accordo con i risultati ottenuti dai test analizzati si può dire che l'AR in combinazione con terapie convenzionali sembri rivelarsi utile per quasi tutti i trattamenti descritti. Tuttavia non sono stati ottenuti risultati positivi nei test per la congelazione del parkinson [63]. Inizialmente le prospettive della ricerca vedevano la realtà estesa come un miglioramento, un supporto a pratiche già esistenti, ma il suo ruolo appare molto più significativo fino al punto che queste tecnologie diventano abilitanti per attività che prima non erano concepibili. L'obiettivo generale è l'assistenza di qualità e/o coinvolgimento cercando di ricreare un rapporto in presenza anche se svolto a distanza [30]. Inoltre a causa della diversità degli interventi e alle variabili misurate non è possibile trovare un consenso sul miglior sistema di AR negli ambiti studiati. In futuro serviranno test clinici che sfruttino un campione più vasto e con maggiore omogeneità riguardo l'uso dei dispositivi utilizzati, frequenza e intensità degli interventi [63].

L'utilizzo della MR sembra promettente anche negli Ambient Assisted Living (di solito abbreviata "AAL"): una serie di soluzioni a livello di prodotto o servizio tecnologico che concorrono, in modo coordinato, a migliorare l'ambiente in cui viviamo [12].

3.5 Limitazioni di questo studio

Questa ricerca prova a fornire uno stato dell'arte dell'utilizzo della realtà mista in ambito healthcare senza applicare filtri per le metodologie di applicazioni utilizzate nei testi. È possibile che molti testi rilevanti non siano stati trovati principalmente per due motivi:

- è stato utilizzato solo Scopus come database di ricerca dei testi;
- eventuali parole chiave non utilizzate;
- il termine "realtà mista" è stato poco utilizzato fino a pochi anni fa e molti di questi testi hanno definito il proprio lavoro come "realtà aumentata".

Nell'ultimo periodo il tema della realtà mista è diventato comunque di molto interesse per la comunità scientifica e il numero di pubblicazione sembra essere in forte aumento.

Conclusioni

Nonostante lo stato della ricerca sia molto avanzato con valutazioni molto positive, l'utilizzo a scopo non formativo sembra ancora relativamente non molto adottato nella pratica. C'è un aumento della tendenza del numero di pubblicazioni riguardo la MR, ma servirebbero più studi clinici rilevanti sui suoi effetti in campo sanitario [17] [48] [63]. Inoltre, per le *review* scientifiche come questo testo, risulta complicato comparare i risultati e sintetizzarli a causa dell'eterogeneità dei metodi utilizzati [53] [63]. I domini medici che utilizzano tecnologie di visualizzazione sembrano essere i più studiati, ma in ambito formativo sembra prendere piede l'utilizzo di interfacce aptiche. Infine, dai risultati statistici iniziali (sezione 2.4.3), la tecnologia MR appare attualmente più interessante in ambito formativo che nelle applicazioni pratiche, conclusione in disaccordo con altre *review* più recenti [17]. Questo disaccordo potrebbe essere dovuto al metodo di ricerca utilizzato in questa tesi per interrogare il database dei testi.

Per determinare più fedelmente lo stato dell'arte della realtà mista in ambito healthcare, si consiglia di valutare un metodo di ricerca più focalizzato sui testi degli ultimi anni che sembrano avere ottenuto risultati clinici considerati più rilevanti.

Bibliografia

- [1] Zia Agha, Ralph Schapira, Purushottam Laud, Gail McNutt, and Debra Roter. Patient satisfaction with physician-patient communication during telemedicine. *Telemedicine journal and e-health : the official journal of the American Telemedicine Association*, 15:830–9, 11 2009.
- [2] Panagiotis E Antoniou, Eleni Daffi, George Arfaras, and Panagiotis D Bamidis. Versatile mixed reality medical educational spaces; requirement analysis from expert users. *Personal and Ubiquitous Computing*, 21:1015–1024, 2017.
- [3] Beatrice Aruanno, Franca Garzotto, and Mario Covarrubias Rodriguez. Hololens-based mixed reality experiences for subjects with alzheimer’s disease. In *Proceedings of the 12th Biannual Conference on Italian SIG-CHI Chapter, CHIItaly ’17*, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [4] Steve Aukstakalnis. *Practical augmented reality: A guide to the technologies, applications, and human factors for AR and VR*. Addison-Wesley Professional, 2016.
- [5] Ronald T. Azuma. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4):355–385, 08 1997.
- [6] Lauren Ballantyne. Comparing 2d and 3d imaging. *Journal of Visual Communication in Medicine*, 34(3):138–141, 2011.
- [7] Sandra Barteit, Lucia Lanfermann, Till Bärnighausen, Florian Neuhaus, Claudia Beiersmann, et al. Augmented, mixed, and virtual reality-based head-mounted devices for medical education: systematic review. *JMIR serious games*, 9(3):e29080, 2021.
- [8] Reinhold Behringer, Johannes Christian, Andreas Holzinger, and Steve Wilkinson. Some usability issues of augmented and mixed reality for e-health applications in the medical domain. In *HCI and Usability for Medicine and Health Care*, pages 255–266, 11 2007.

-
- [9] Oliver Bimber and Ramesh Raskar. *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A. K. Peters, Ltd., USA, 2005.
- [10] H Brun, R A B Bugge, L K R Suther, S Birkeland, R Kumar, E Pelanis, and O J Elle. Mixed reality holograms for heart surgery planning: first user experience in congenital heart disease. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*, 20(8):883–888, 12 2018.
- [11] Long Chen, Thomas W Day, Wen Tang, and Nigel W John. Recent developments and future challenges in medical mixed reality. In *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pages 123–135, 2017.
- [12] Ricardo Costa, Jose Neves, Paulo Novais, José Machado, Luís Lima, and Carlos Alberto. Intelligent mixed reality for the creation of ambient assisted living. In *Progress in Artificial Intelligence*, pages 323–331, 11 2007.
- [13] Alan B. Craig. Chapter 1 - what is augmented reality? In Alan B. Craig, editor, *Understanding Augmented Reality*, pages 1–37. Morgan Kaufmann, Boston, 2013.
- [14] Julia Diemer, Georg W. Alpers, Henrik M. Peperkorn, Youssef Shiban, and Andreas Mühlberger. The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 6, 2015.
- [15] Margaret Duff, Yinpeng Chen, Long Cheng, Sheng-Min Liu, Paul Blake, Steven L Wolf, and Thanassis Rikakis. Adaptive mixed reality rehabilitation improves quality of reaching movements more than traditional reaching therapy following stroke. *Neurorehabilitation and neural repair*, 27(4):306–315, 2013.
- [16] Nina Döllinger, Carolin Wienrich, and Marc Erich Latoschik. Challenges and opportunities of immersive technologies for mindfulness meditation: A systematic review. *Frontiers in Virtual Reality*, 2, 2021.
- [17] Martin Eckert, Julia S Volmerg, Christoph M Friedrich, et al. Augmented reality in medicine: systematic and bibliographic review. *JMIR mHealth and uHealth*, 7(4):e10967, 2019.
- [18] P.J. Edwards, A.P. King, C.R. Maurer, D.A. De Cunha, D.J. Hawkes, D.L.G. Hill, R.P. Gaston, M.R. Fenlon, A. Juszczek, A.J. Strong, C.L. Chandler, and M.J. Gleeson. Design and evaluation of a system for

- microscope-assisted guided interventions (magi). *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 19(11):1082–1093, 2000.
- [19] Brian Fiani, Frank De Stefano, Athanasios Kondilis, Claudia Covarrubias, Louis Reier, and Kasra Sarhadi. Virtual reality in neurosurgery: “can you see it?”-a review of the current applications and future potential. *World Neurosurg.*, 141:291–298, September 2020.
- [20] Borko Furht. *Handbook of augmented reality*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [21] Danilo Gasques Rodrigues, Ankur Jain, Steven R Rick, Liu Shangle, Preetham Suresh, and Nadir Weibel. Exploring mixed reality in specialized surgical environments. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 2591–2598, 2017.
- [22] Jaris Gerup, Camilla Sørensen, and Peter Dieckmann. Augmented reality and mixed reality for healthcare education beyond surgery: an integrative review. *International Journal of Medical Education*, 11:241–258, 01 2020.
- [23] Hamid Ghaednia, Mitchell S Fourman, Amanda Lans, Kelsey Detels, Hilde Dijkstra, Sophie Lloyd, Allison Sweeney, Jacobien HF Oosterhoff, and Joseph H Schwab. Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials. *The Spine Journal*, 21(10):1617–1625, 2021.
- [24] Hyun Goo, Sang Joon Park, and Shi-Joon Yoo. Advanced medical use of three-dimensional imaging in congenital heart disease: Augmented reality, mixed reality, virtual reality, and three-dimensional printing. *Korean Journal of Radiology*, 21, 02 2020.
- [25] Thomas Gregory, Jules Grégory, John Sledge, Romain Allard, and Olivier Mir. Surgery guided by mixed reality: presentation of a proof of concept. *Acta orthopaedica*, 89:480–483, 10 2018.
- [26] Martina Gurgitano, Salvatore Alessio Angileri, Giovanni Maria Rodà, Alessandro Liguori, Marco Pandolfi, Anna Maria Ierardi, Bradford J Wood, and Gianpaolo Carrafiello. Interventional radiology ex-machina: impact of artificial intelligence on practice. *Radiol. Med.*, 126(7):998–1006, July 2021.
- [27] Jennifer Fong Ha and Nancy Longnecker. Doctor-patient communication: a review. *Ochsner J.*, 10(1):38–43, 2010.

- [28] Stephanie Habak, Jill Bennett, Alex Davies, Michaela Davies, Helen Christensen, and Katherine Boydell. Edge of the present: A virtual reality tool to cultivate future thinking, positive mood and wellbeing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18:140, 12 2020.
- [29] Alaric Hamacher, Su Jin Kim, Sung Tae Cho, Sunil Pardeshi, Seung Hyun Lee, Sung-Jong Eun, and Taeg Keun Whangbo. Application of virtual, augmented, and mixed reality to urology. *International neurourology journal*, 20(3):172, 2016.
- [30] Donald Hilty, Karan Randhawa, Marlene Maheu, Alastair McKean, Richard Pantera, Matthew Mishkind, and Albert Rizzo. A review of telepresence, virtual reality, and augmented reality applied to clinical care. *Journal of Technology in Behavioral Science*, 5:1–28, 06 2020.
- [31] Kristopher G Hooten, J Richard Lister, Gwen Lombard, David E Lizardas, Samsun Lampotang, Didier A Rajon, Frank Bova, and Gregory JA Murad. Mixed reality ventriculostomy simulation: experience in neurosurgical residency. *Neurosurgery*, 10:576–581, 2014.
- [32] Min-Chai Hsieh and Yu-Hsuan Lin. Vr and ar applications in medical practice and education. *Hu Li Za Zhi*, 64(6):12–18, 2017.
- [33] H. Iwata, H. Yano, T. Uemura, and T. Moriya. Food simulator: a haptic interface for biting. In *IEEE Virtual Reality 2004*, pages 51–57, 2004.
- [34] Allan Javaux, David Bouget, Caspar Gruijthuijsen, Danail Stoyanov, Tom Vercauteren, Sebastien Ourselin, Jan Deprest, Kathleen Denis, and Emmanuel Vander Poorten. A mixed-reality surgical trainer with comprehensive sensing for fetal laser minimally invasive surgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 13, 07 2018.
- [35] Leo Kobayashi, Xiao Zhang, Scott Collins, Naz Karim, and Derek Merck. Exploratory application of augmented reality/mixed reality devices for acute care procedure training. *Western Journal of Emergency Medicine*, 19:158–164, 01 2018.
- [36] Kurt Koffka. *Principi di psicologia della forma / Kurt Koffka*. Testi e manuali della scienza contemporanea. Serie di psicologia e psichiatria. Boringhieri, Torino, 1970.
- [37] Martijn J.L. Kors, Gabriele Ferri, Erik D. van der Spek, Cas Ketel, and Ben A.M. Schouten. A breathtaking journey. on the design of an

- empathy-arousing mixed-reality game. In *Proceedings of the 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, CHI PLAY '16*, page 91–104, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [38] Lik-Hang Lee, Tristan Braud, Pengyuan Zhou, Lin Wang, Dianlei Xu, Zijun Lin, Abhishek Kumar, Carlos Bermejo, and Pan Hui. All one needs to know about metaverse: A complete survey on technological singularity, virtual ecosystem, and research agenda. *arXiv preprint arXiv:2110.05352*, 2021.
- [39] Ci-Jyun Liang, Charles Start, Hanna Boley, Vineet Kamat, Carol Menassa, and Michelle Aebbersold. Enhancing stroke assessment simulation experience in clinical training using augmented reality. *Virtual Reality*, 25:1–10, 09 2021.
- [40] Benjamin Lok, Joon Chuah, Andrew Robb, Andrew Cordar, Samsun Lamptang, Adam Wendling, and Casey White. Mixed-reality humans for team training. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 34:72–75, 05 2014.
- [41] Paul Milgram and Fumio Kishino. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Trans. Information Systems*, vol. E77-D, no. 12:1321–1329, 12 1994.
- [42] Paul Anderson Minhua Ma, Lakhmi C. Jain. *Virtual, Augmented Reality and Serious Games for Healthcare 1*. Springer, 2014.
- [43] Camilo A Molina, Frank M Phillips, Matthew W Colman, Wilson Z Ray, Majid Khan, Kornelis Poelstra, Larry Khoo, et al. A cadaveric precision and accuracy analysis of augmented reality-mediated percutaneous pedicle implant insertion: presented at the 2020 aans/cns joint section on disorders of the spine and peripheral nerves. *Journal of Neurosurgery: Spine*, 34(2):316–324, 2020.
- [44] Tadatsugu Morimoto, Takaomi Kobayashi, Hirohito Hirata, Koji Otsu, Maki Sugimoto, Masatsugu Tsukamoto, Tomohito Yoshihara, Masaya Ueno, and Masaaki Mawatari. Xr (extended reality: Virtual reality, augmented reality, mixed reality) technology in spine medicine: Status quo and quo vadis. *Journal of Clinical Medicine*, 11(2), 2022.
- [45] Takuji Narumi, Takashi Kajinami, Shinya Nishizaka, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Pseudo-gustatory display system based on cross-

- modal integration of vision, olfaction and gustation. In *2011 IEEE Virtual Reality Conference*, pages 127–130, 2011.
- [46] Renato Olmos, D. Rietbergen, Sergi Vidal-Sicart, Gianpiero Manca, Francesco Giammarile, and G Mariani. Contribution of spect/ct imaging to radioguided sentinel lymph node biopsy in breast cancer, melanoma, and other solid cancers: from "open and see" to "see and open". *The quarterly journal of nuclear medicine and molecular imaging: official publication of the Italian Association of Nuclear Medicine (AIMN) [and] the International Association of Radiopharmacology (IAR), [and] Section of the Society of...*, 58:127–139, 06 2014.
- [47] Renato Olmos, Sergi Vidal-Sicart, Francesco Giammarile, John Zaknun, Fijis W.B. Leeuwen, and G Mariani. The gostt concept and hybrid mixed/virtual/augmented reality environment radioguided surgery diagnostic oncology. *Q J Nucl Med Mol Imaging*, 58:207–215, 06 2014.
- [48] Chee Wui Ong, Marcus Chun Jin Tan, Michael Lam, and Victor Teck Chang Koh. Applications of extended reality in ophthalmology: Systematic review. *J. Med. Internet Res.*, 23(8):e24152, August 2021.
- [49] Emma Elizabeth Phelps, Richard Wellings, Frances Griffiths, Charles Hutchinson, and Melina Kunar. Do medical images aid understanding and recall of medical information? an experimental study comparing the experience of viewing no image, a 2d medical image and a 3d medical image alongside a diagnosis. *Patient Education and Counseling*, 100(6):1120 – 1127, 2017.
- [50] Francesco Porpiglia, Enrico Checcucci, Daniele Amparore, Dario Peretti, Federico Piramide, Sabrina De Cillis, Alberto Piana, Gabriel Niculescu, Paolo Verri, Matteo Manfredi, Massimiliano Poggio, Ilaria Stura, Giuseppe Migliaretti, Marco Cossu, and Cristian Fiori. Percutaneous kidney puncture with three-dimensional mixed-reality hologram guidance: From preoperative planning to intraoperative navigation. *Eur. Urol.*, 81(6):588–597, June 2022.
- [51] Giuseppe Riva, Rosa M. Baños, Cristina Botella, Fabrizia Mantovani, and Andrea Gaggioli. Transforming experience: The potential of augmented reality and virtual reality for enhancing personal and clinical change. *Frontiers in Psychiatry*, 7, 2016.
- [52] Albert Robinson, Nikolaus Gravenstein, Lou Cooper, David Lizdas, Isaac Luria, and Samsun Lampotang. A mixed-reality part-task trainer for

- subclavian venous access. *Simulation in healthcare : journal of the Society for Simulation in Healthcare*, 9, 12 2013.
- [53] Sue Rourke. How does virtual reality simulation compare to simulated practice in the acquisition of clinical psychomotor skills for pre-registration student nurses? a systematic review. *Int. J. Nurs. Stud.*, 102(103466):103466, February 2020.
- [54] Jeremy S Ruthberg, Galen Tingle, Lisa Tan, Lauren Ulrey, Sue Simonson-Shick, Rebecca Enterline, Henry Eastman, Jeffrey Mlakar, Robert Gotschall, Erin Henninger, Mark A Griswold, and Susanne Wish-Baratz. Mixed reality as a time-efficient alternative to cadaveric dissection. *Med. Teach.*, 42(8):896–901, August 2020.
- [55] Paweł Rynio, Jan Witowski, Jakub Kamiński, Jakub Serafin, Arkadiusz Kazimierczak, and Piotr Gutowski. Holographically-guided endovascular aneurysm repair. *J. Endovasc. Ther.*, 26(4):544–547, August 2019.
- [56] Amir H Sadeghi, Sulayman El Mathari, Djamila Abjigitova, Alexander PWM Maat, Yannick JHJ Taverne, Ad JJC Bogers, and Edris AF Mahtab. Current and future applications of virtual, augmented, and mixed reality in cardiothoracic surgery. *The Annals of Thoracic Surgery*, 113(2):681–691, 2022.
- [57] Lohrasb R Sayadi, Alexandra Naidas, Maddie Eng, Arman Fijany, Mustafa Chopan, Jamasb J Sayadi, Ashkaun Shaterian, Derek A Banyard, Gregory R D Evans, Raj Vyas, and Alan D Widgerow. The New Frontier: A Review of Augmented Reality and Virtual Reality in Plastic Surgery. *Aesthetic Surgery Journal*, 39(9):1007–1016, 02 2019.
- [58] Dieter Schmalstieg and Tobias Höllerer. Augmented reality: Principles and practice. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, 2017.
- [59] Luc Soler, Stéphane Nicolau, Patrick Pessaux, Didier Mutter, and Jacques Marescaux. Real-time 3d image reconstruction guidance in liver resection surgery. *Hepatobiliary surgery and nutrition*, 3:73–81, 04 2014.
- [60] Robert Stone, R Guest, P Mahoney, D Lamb, and C Gibson. A ‘mixed reality’ simulator concept for future medical emergency response team training. *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 163:jamc–2016, 01 2017.
- [61] Todd Stretton, Thomas Cochrane, and Vickel Narayan. Exploring mobile mixed reality in healthcare higher education: a systematic review. *Research in Learning Technology*, 26:2131–2131, 2018.

- [62] Maki Sugimoto, Hideki Yasuda, Keiji Koda, Masato Suzuki, Masato Yamazaki, Tohru Tezuka, Chihiro Kosugi, Ryota Higuchi, Yoshihisa Watayo, Yohsuke Yagawa, Shuichiro Uemura, Hironori Tsuchiya, and Takeshi Azuma. Image overlay navigation by markerless surface registration in gastrointestinal, hepatobiliary and pancreatic surgery. *Journal of hepato-biliary-pancreatic sciences*, 17:629–36, 10 2009.
- [63] Maria Jesus Vinolo Gil, Gloria Gonzalez-Medina, David Lucena-Anton, Veronica Perez-Cabezas, María Del Carmen Ruiz-Moliner, and Rocío Martín-Valero. Augmented reality in physical therapy: Systematic review and meta-analysis. *JMIR Serious Games*, 9(4):e30985, December 2021.
- [64] Francesco Volonté, Nicolas Buchs, François Pugin, Joël Spaltenstein, Boris Schiltz, Minoa Jung, Monika Hagen, Osman Ratib, and Philippe Morel. Augmented reality to the rescue of the minimally invasive surgeon. the usefulness of the interposition of stereoscopic images in the da vinci (tm) robotic console. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*, 9, 09 2013.
- [65] Christopher J. Wilson and Alessandro Soranzo. The use of virtual reality in psychology: A case study in visual perception. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015:151702, Aug 2015.
- [66] Eric L. Wisotzky, Jean-Claude Rosenthal, Peter Eisert, Anna Hilsmann, Falko Schmid, Michael Bauer, Armin Schneider, and Florian C. Uecker. Interactive and multimodal-based augmented reality for remote assistance using a digital surgical microscope. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 1477–1484, 2019.
- [67] Nannan Xi, Juan Chen, Filipe Gama, Marc Riar, and Juho Hamari. The challenges of entering the metaverse: An experiment on the effect of extended reality on workload. *Inf. Syst. Front.*, pages 1–22, February 2022.
- [68] Tomoya Yamada, Satoshi Yokoyama, Tomohiro Tanikawa, Koichi Hirota, and Michitaka Hirose. Wearable olfactory display: Using odor in outdoor environment. In *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, pages 199–206. IEEE, 2006.
- [69] Ellnaz Yazdan Parast, Fatemeh Fakhrealizadeh, F Moghadam, H Ramezani, SH Ghorbani, and Davoudi M. The relation between physical space standards, equipment standards, safety, health care and general

- health issues concerning the operating room personnel in university/educational hospitals affiliated with birjand university of medical sciences. *Occupational Medicine*, 11 2019.
- [70] Ali K Yetisen, Juan Leonardo Martinez-Hurtado, Barış Ünal, Ali Khademhosseini, and Haider Butt. Wearables in medicine. *Advanced Materials*, 30(33):1706910, 2018.
- [71] Andy Wai Kan Yeung, Anela Tosevska, Elisabeth Klager, Fabian Eibensteiner, Daniel Laxar, Jivko Stoyanov, Marija Glisic, Sebastian Zeiner, Stefan Tino Kulnik, Rik Crutzen, Oliver Kimberger, Maria Kletecka-Pulker, Atanas G Atanasov, and Harald Willschke. Virtual and augmented reality applications in medicine: Analysis of the scientific literature. *J. Med. Internet Res.*, 23(2):e25499, February 2021.
- [72] Rachel Yudkowsky, Cristian Luciano, Pat Banerjee, Alan Schwartz, Ali Alaraj, G Michael Lemole, Jr, Fady Charbel, Kelly Smith, Silvio Rizzi, Richard Byrne, Bernard Bendok, and David Frim. Practice on an augmented reality/haptic simulator and library of virtual brains improves residents' ability to perform a ventriculostomy. *Simul. Healthc.*, 8(1):25–31, February 2013.
- [73] Egui Zhu, Arash Hadadgar, Italo Masiello, and Nabil Zary. Augmented reality in healthcare education: an integrative review. *PeerJ*, 2:e469, July 2014.