

Università di Pisa - corso di laurea magistrale in Ingegneria Biomedica

## **CHIRURGIA ASSISTITA DAL CALCOLATORE**

**Dispensa del corso del Prof. Vincenzo Ferrari AA 2016-17**

## **REALTA' AUMENTATA IN CHIRURGIA**

Dagli appunti di: **Simone Di Palma**

## Realtà Aumentata

Il concetto più generale di Realtà Aumentata fa riferimento a quelle metodiche il cui scopo è fornire all'utente un ampliamento delle proprie capacità sensoriali in modo virtuale. Ad esempio un guanto opportunamente realizzato per restituire feedback tattili "toccando" un oggetto virtuale potrebbe costituire un sistema di realtà aumentata tattile. In queste pagine saranno trattati solo argomenti di realtà aumentata visiva.

Alla base di un sistema di Realtà Aumentata risiede la coesistenza di elementi fisici reali e oggetti virtuali. In questo scenario è lecito domandarsi quanto sia conservato rispetto al mondo reale e quanto sia introdotto in modo virtuale. Nel 1994 Milgram, per descrivere questo nuovo ordine di idee, elaborò il concetto di Reality-Virtual Continuum secondo il quale il mondo virtuale e il mondo reale sono considerati come uno stesso universo nel quale reale e virtuale possono mescolarsi in modo graduale. Il diagramma di Milgram (Fig. 1) riporta sull'estremo sinistro del Continuum il mondo reale e sull'estremo destro il mondo virtuale. Lo spettro di possibilità intermedie tra i due estremi è stato definito *Mixed Reality* e, a seconda della prevalenza (a carattere reale o virtuale) del suo contenuto informativo, si caratterizza in Realtà Aumentata e Virtualità Aumentata.

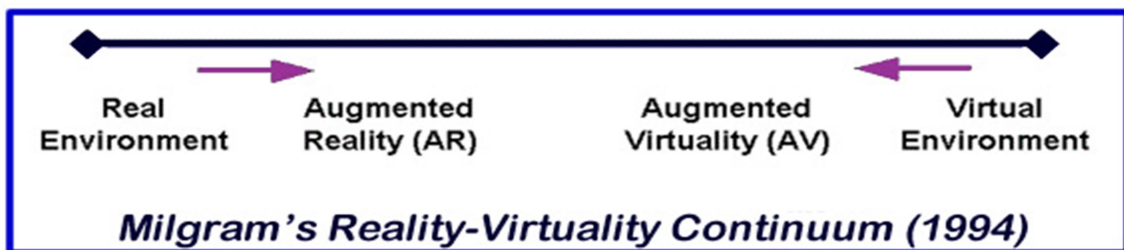


Fig. 1: Diagramma di Milgram

Nella Virtualità Aumentata il soggetto è immerso in un mondo completamente virtuale con il quale può interagire attraverso opportune interfacce ed elementi dell'ambiente reale sono aggiunti con tecniche di realtà virtuale (come ad esempio la texture di alcuni oggetti acquisita da una camera nel mondo reale). Al contrario la Realtà Aumentata lascia l'utente all'interno del mondo reale ma fornisce nuove possibilità di interazione con il mondo reale stesso grazie alla presenza di elementi virtuali. Quindi, seguendo questa logica, in termini generali bisognerebbe parlare di *Mixed Reality* e poi, ad un livello di dettaglio ulteriore, a seconda dell'entità del contributo reale rispetto a quello virtuale, di *Augmented Reality* o *Augmented Virtuality*. In realtà oggi, il termine *Augmented Reality* è perlopiù utilizzato in termini generici con il significato più ampio di *Mixed Reality*.

Per le sue promettenti potenzialità la Realtà Aumentata ha trovato impiego in diversi campi permettendo agli utenti un'interazione più intuitiva e una più semplice comprensione di alcuni aspetti del mondo reale. A titolo di esempio si mostrano di seguito alcuni settori nei quali la Realtà Aumentata ha consentito di migliorare la percezione del mondo reale inserendovi oggetti in modo coerente con lo spazio reale stesso. Se in campo medico, come approfondiremo meglio in seguito, la Realtà Aumentata è ancora in una fase embrionale, in altri campi ha raggiunto una certa maturità, come ad esempio nell'industria militare e manifatturiera, nelle applicazioni mobile, e nelle trasmissioni sportive.

Già dagli anni '90, ad esempio, alcune industrie (soprattutto nel campo automotive ed aeronautico) hanno adottato sistemi di Realtà Aumentata senza limitarne l'utilizzo a contesti dimostrativi e di marketing ma facendola entrare nel vivo dei processi produttivi: sono stati messi a punto sistemi per guidare gli operatori nelle fasi di assemblaggio di componentistica meccanica o di manutenzione in modo da ridurre errori e tempi di esecuzione (Fig. 2). Sempre nello stesso settore vi sono ora funzionalità rivolte direttamente ai guidatori in modo da fornire istruzioni utili e assistenza durante la guida ed il parcheggio.



Fig.2 Realtà Aumentata nell'industria automobilistica

Nel mondo televisivo la Realtà Aumentata è ormai consolidata. Da tempo è impiegata nelle trasmissioni delle previsioni metereologiche in cui il meteorologo sembra indicare le condizioni meteo su uno schermo retrostante (Fig.3a). In realtà il soggetto ha alle sue spalle un pannello colorato uniformemente per permettere la tecnica del *chroma key*: essa consente di unire due sorgenti video a seguito di una segmentazione ottenuta grazie alla componente cromatica uniforme sullo sfondo. Nel caso delle trasmissioni meteo, un video è quello con la mappa metereologica e l'altro è quello del meteorologo che si muove sullo sfondo uniforme. L'operazione di segmentazione identifica lo sfondo monocromatico in modo da poterlo rimuovere e considerare nel video solo il meteorologo che può, a questo punto, essere sovrapposto al video con la mappa

meteorologica. Nel chroma key, la persona non può quindi indossare indumenti dello stesso colore dello sfondo.

Sempre in ambito televisivo la Realtà Aumentata è molto sfruttata in trasmissioni sportive con l'obiettivo di facilitare la comprensione da parte del pubblico (Fig. 3b). E' possibile far comparire informazioni aggiuntive sulla scena come ad esempio: linee fittizie sui campi da football, indicazioni come nomi e punteggi degli atleti durante una gara, velocità e posizioni relative delle imbarcazioni durante una competizione tra barche a vela.

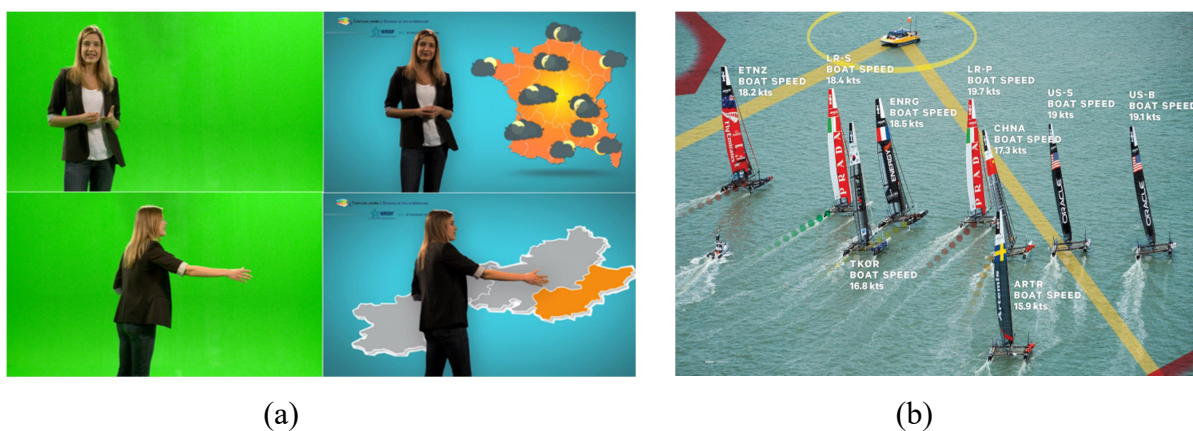


Fig. 3: Realtà Aumentata in ambito televisivo

Un ulteriore campo di applicazione riguarda l'architettura e l'archeologia. In entrambi i casi la realtà aumentata offre ad esempio la possibilità di visualizzare delle costruzioni virtuali. Le immagini virtuali di un edificio possono essere sovrapposte alla vista reale di un sito prima della realizzazione fisica dello stesso (Fig. 4a). Allo stesso modo un sito archeologico può fornirsi di un sistema di realtà aumentata per restituire ai visitatori l'aspetto originale di edifici, statue o strade (Fig. 4b).

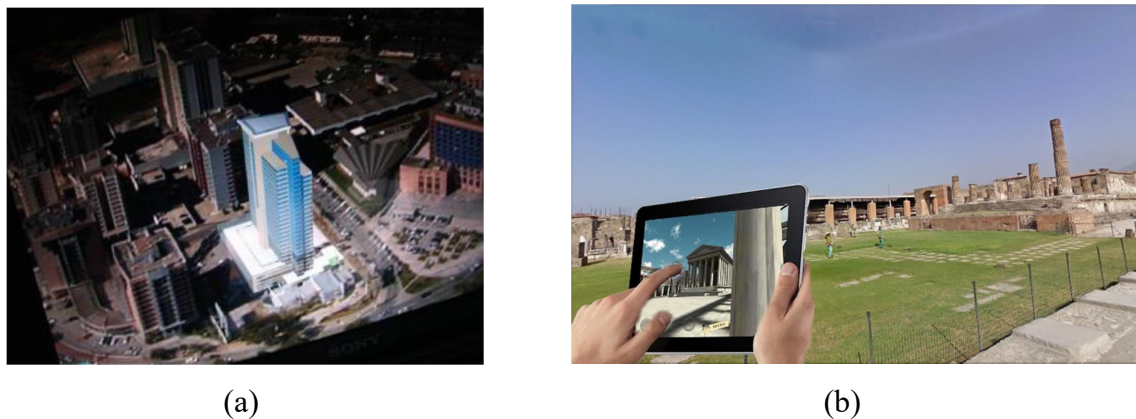


Fig. 4: Realtà Aumentata in architettura e archeologia

## Realtà Aumentata in chirurgia

L'interesse in chirurgia delle tecniche di realtà aumentata è soprattutto legato alla possibilità di sovrapporre al paziente reale una rappresentazione virtuale della sua anatomia interna oppure una guida per effettuare accessi chirurgici lungo la giusta traiettoria.

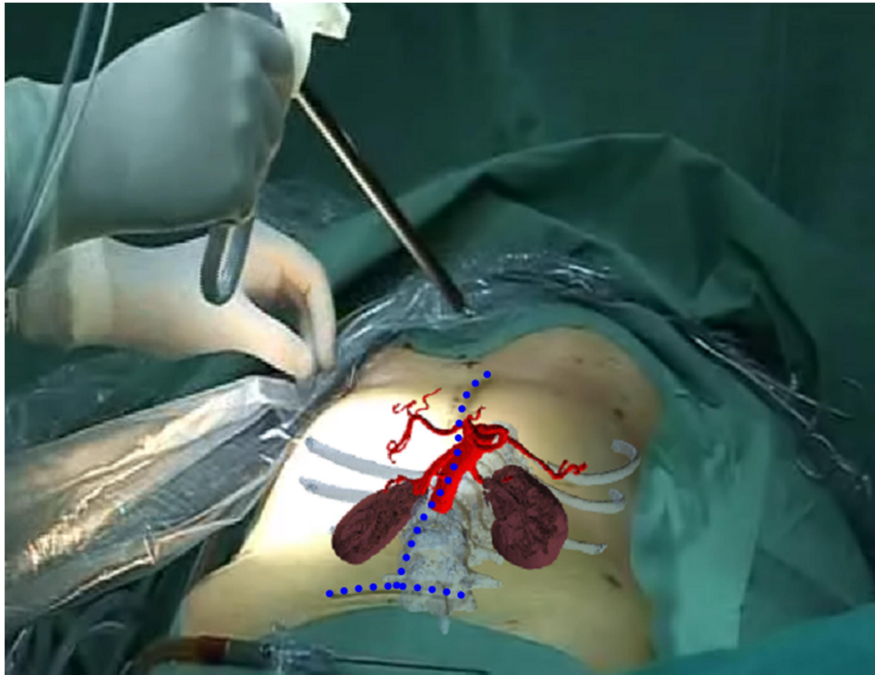


Fig. 5: Realtà Aumentata in chirurgia

In questo tipo di applicazioni diventa cruciale il procedimento che porta ad ottenere una registrazione del virtuale sul reale in modo da avere coerenza tra i due contenuti. (NB: anche in questo caso si parla di registrazione e, in questo caso, ci sono ulteriori aspetti da considerare oltre a quelli visti per la registrazione delle immagini sul paziente). Considerando le difficoltà ancora esistenti riguardanti la registrazione su tessuti molli, la Realtà Aumentata ha trovato i suoi primi impieghi in medicina nelle procedure con strutture rigide come ad esempio la neurochirurgia (almeno per quanto riguarda la parte relativa all'accesso chirurgico), la chirurgia ortopedica e quella maxillofacciale. Prima di entrare nel merito con alcuni esempi specifici di applicazioni in campo chirurgico è necessario premettere che, sebbene la Realtà Aumentata abbia molte potenzialità, si tratta di una possibilità che deve essere attentamente valutata prima di essere inserita all'interno del workflow chirurgico. In campo medico, infatti, la tecnologia non è ancora pienamente matura e, in alcuni casi, la sua introduzione potrebbe risolversi in una complicazione piuttosto che una

semplificazione del lavoro in sala operatoria. Vediamo ora alcuni esempi in cui la Realtà Aumentata sembra promettere risultati promettenti.

In chirurgia ortopedica e maxillofacciale alcune procedure richiedono un posizionamento molto preciso tra strutture anatomiche rigide sulla base di un planning pre-operatorio. Il chirurgo deve quindi riuscire ad allineare le parti in gioco in modo più fedele possibile a quanto pianificato in fase pre-operatoria. A questo scopo sono stati messi a punto sistemi basati sulla Realtà Aumentata che consentono di guidare la procedura. In fig. 6 è mostrato un caso di studio sul corretto riposizionamento mascellare superiore negli interventi di chirurgia ortognatica. L'operatore indossa un sistema per realtà aumentata per visualizzare i marcatori virtuali con i quali far coincidere quelli reali che, in questo caso, consistono con i brackets dell'apparecchio ortodontico che indossano tutti i pazienti che si sottopongono a questo tipo di interventi.

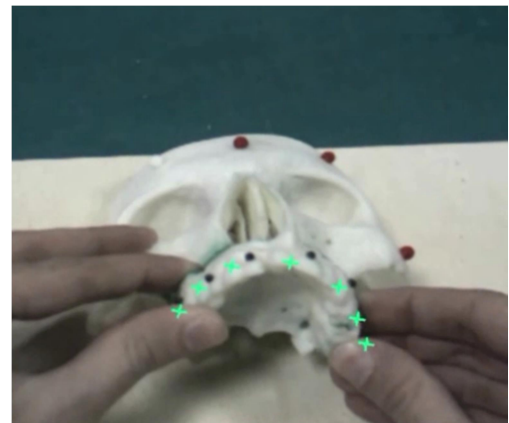


Fig. 6: Il visore per realtà aumentata mostra in verde il posizionamento dei marcatori virtuali con i quali ottenere il corretto allineamento dei marcatori reali.

Un altro esempio riguarda il raggiungimento di target intracorporei con approccio percutaneo. L'esempio fa riferimento a procedure di vertebroplastica percutanee in cui sono trattate patologie vertebrali attraverso l'iniezione di cemento biocompatibile all'interno del soma vertebrale. L'iniezione avviene attraverso uno strumento detto *trocar* e la complessità dell'intervento risiede nella difficoltà di orientare correttamente lo strumento per garantire una giusta traiettoria di intervento. Nella tecnica tradizionale, l'iniezione del cemento può essere seguita sotto controllo fluoroscopico durante la procedura. Lo studio in vitro nell'ambito della vertebroplastica mostrato in fig. 7 ha sfruttato la Realtà Aumentata consentendo di individuare prima il punto di accesso sulla cute del paziente e poi, tramite l'allineamento di due mirini, ottenere il corretto orientamento del trocar per il raggiungimento del target previsto.

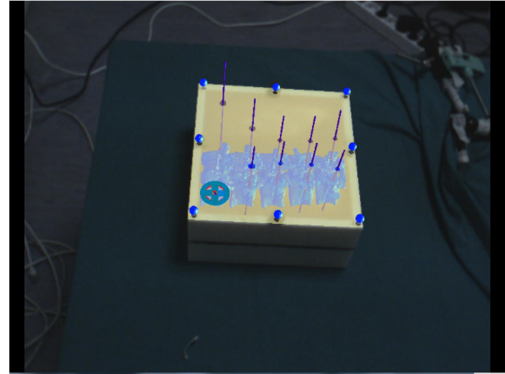
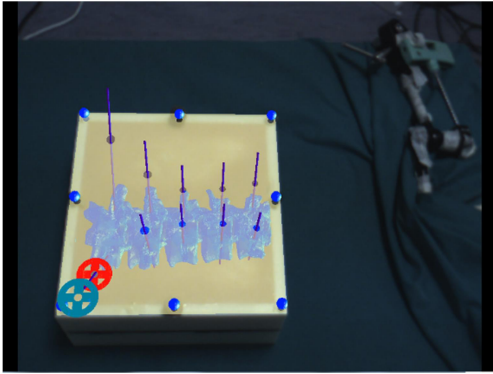


Fig. 7: Inserimento guidato di un trocar in procedure di vertebroplastica percutanea

## Componenti Hardware di un sistema di realtà aumentata

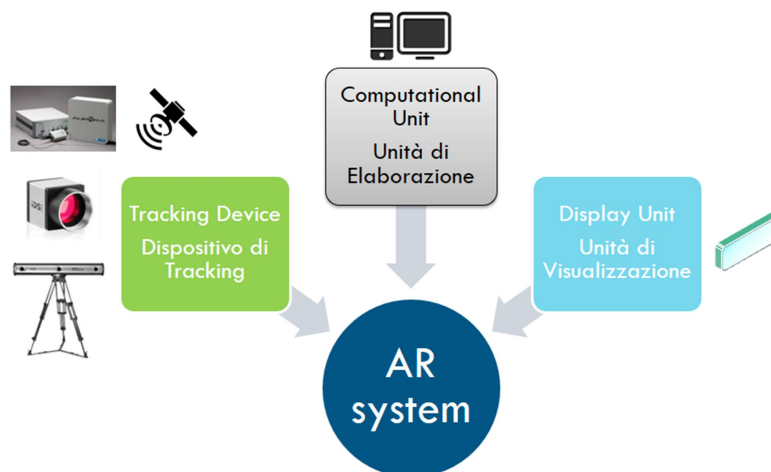


Fig. 8: Componenti hardware fondamentali di un sistema di realtà aumentata

In generale un sistema di realtà aumentata è composto da:

- un'unità di elaborazione
- sistemi di tracking
- un'unità di visualizzazione

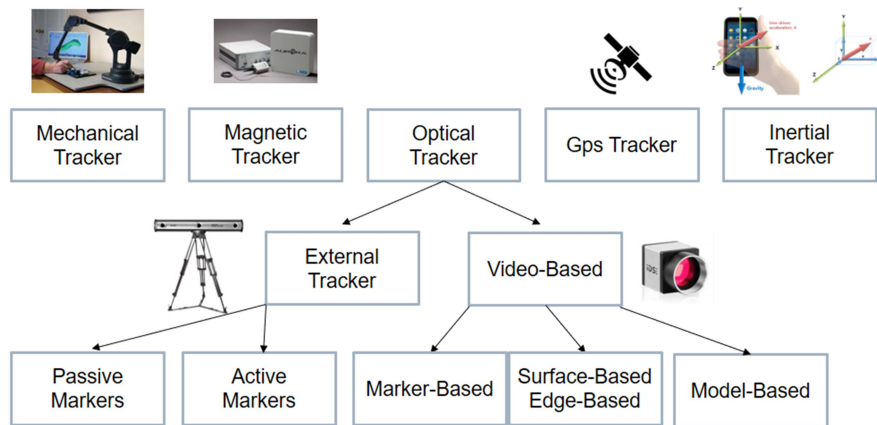


Fig. 9: Sistemi di tracking in realtà aumentata

I **sistemi di tracking** che in generale possono essere utilizzati nell'implementazione di un sistema di realtà aumentata sono mostrati in fig. 9. Un sistema di localizzazione può essere utile per tracciare la posizione dell'utente e dei vari dispositivi in gioco in modo da allineare tutti i sistemi di riferimento al fine di rendere coerenti tra loro l'informazione reale e quella virtuale dopo un'operazione di registrazione. Si ricorda che i localizzatori meccanici, sempre più in disuso, rilevano la posizione di un punto nello spazio risolvendo un problema di cinematica diretta noti gli angoli ai giunti forniti da encoder potenziometrici e la lunghezza dei link che costituiscono il braccio meccanico. I localizzatori elettromagnetici sfruttano un emettitore di campo elettromagnetico e dei sensori costituiti da bobine di cui è possibile tracciare la posizione del baricentro. I sistemi basati su GPS possono essere utilizzati per applicazioni all'aperto (non sono utilizzabili in ambito chirurgico). I sistemi di tracking più utilizzati sono sicuramente i localizzatori ottici, che possono tracciare la posizione di marker attivi o passivi, oppure possono essere video-based. In quest'ultimo caso, si tratta di approcci che sfruttano l'immagine acquisita dalle camere, utilizzate come sorgente di informazione reale nella scena in realtà aumentata, anche per localizzare gli oggetti nell'ambiente. Questi approcci, detti appunto video-based, possono essere basati sul riconoscimento di marcatori, oppure possono essere "marker-less" individuando caratteristiche salienti degli oggetti oppure basandosi sulla conoscenza dell'intero modello 3D da tracciare.

L'**unità di visualizzazione** è il dispositivo grazie al quale l'utente può vedere la scena in realtà aumentata. La sua scelta vincola la direzione lungo la quale l'utente dovrà guardare. Nel caso di chirurgia endoscopica, ad esempio, l'informazione virtuale può essere aggiunta direttamente sul monitor sul quale sono proiettate le immagini endoscopiche: nei casi di questo tipo si parla di display *esocentrici* poiché non tengono conto del punto di vista dell'utente. Si definiscono invece *egocentrici* i visori che privilegiano il punto di vista dell'utente come nel caso di dispositivi



indossabili come un paio di occhiali. Esistono quindi diversi tipi di display per realtà aumentata ed è possibile classificarli in base alla distanza relativa che essi assumono tra l'osservatore e la scena come mostrato in figura.

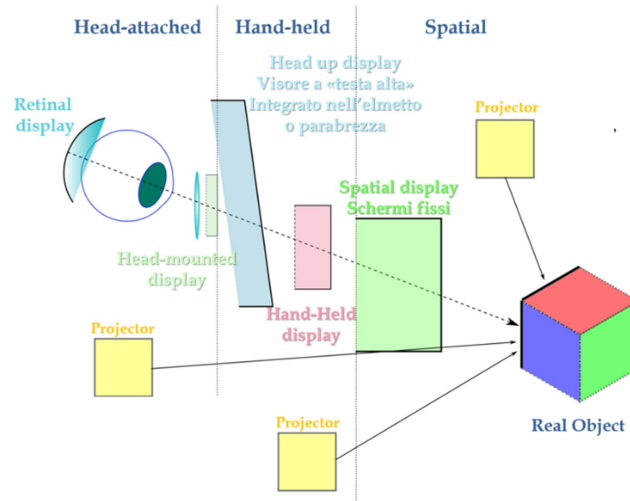


Fig. 10: Classificazione delle diverse tipologie di display di realtà aumentata in funzione della distanza relativa tra osservatore e oggetto (o ambiente osservato)

Gli Head-Mounted-Display (HMD) proiettano le immagini (generate in questo caso su un micro display) sulla retina dell'utente attraverso un sistema di lenti: sono i più utilizzati e sono anche quelli che promettono i maggiori sviluppi tecnologici in chirurgia tradizionale, in cui il chirurgo lavora direttamente con le mani sotto visione diretta. Tutt'ora, anche negli interventi di chirurgia tradizionale aperta, i navigatori chirurgici prevedono che il chirurgo operi sul paziente guardando uno schermo tradizionale, cosa che può portare a difficoltà di coordinamento occhio-mano ed inoltre il chirurgo è costretto a spostare ripetutamente lo sguardo dallo schermo del navigatore al campo operatorio. L'utilizzo di un opportuno visore per realtà aumentata consente invece di riportare lo sguardo del chirurgo direttamente sul paziente così da lavorare sotto la guida dell'informazione virtuale aggiunta. Questi display (meglio approfonditi nel seguito della trattazione) sono indossabili e, come suggerisce il loro nome, sono montati direttamente sulla testa dell'osservatore per rendere la visualizzazione coerente con il suo punto di vista. Soprattutto per quanto riguarda lo sviluppo di applicazioni per smartphone e tablet si parla di hand-helded display, per riferirsi a quei casi in cui la realtà aumentata è implementata su dispositivi portatili. Gli svantaggi degli hand-helded consistono in una limitata dimensione dello schermo e il limitato utilizzo delle mani da parte dell'utente: in una possibile applicazione chirurgica si potrebbe al più pensare di utilizzare piccoli schermi di questo tipo montati su supporti opportuni in modo da favorirne la visualizzazione da parte del chirurgo. Schermi fissi, come quello di un computer o uno schermo presente in sala operatoria, trovano impiego in procedure quali la chirurgia endoscopica in

cui l'ideale è fondere l'informazione virtuale direttamente sul monitor sul quale la camera dell'endoscopio proietta in real-time le immagini acquisite. I proiettori possono essere collocati a varie distanze tra l'osservatore e la scena osservata. Nel caso dei proiettori, a volte, la proiezione degli oggetti virtuali avviene direttamente sul paziente. In questo caso si ottiene un'informazione coerente sola se l'informazione virtuale è relativa alla superficie esposta dell'anatomia. Contrariamente, proiettando un oggetto virtuale relativo ad un'anatomia interna (o non ancora esposta) introdurremmo problematiche di parallasse. Il proiettore infatti, proietta sulla superficie esposta e un organo interno verrebbe visto lungo una traiettoria diversa in funzione del punto di vista dell'osservatore. Per questo motivo, in ambito chirurgico, un proiettore potrebbe essere utilizzato per mostrare una traccia sulla testa del paziente al fine di guidare il chirurgo in una craniotomia, ma non per guidare la rimozione di una lesione in profondità.

Nell'ambito dei sistemi indossabili esistono due principali paradigmi implementativi per i visori: optical see-through e i video see-through. Le due soluzioni, sostanzialmente diverse tra loro, hanno in comune nella loro denominazione l'espressione "see-through" in quanto l'obiettivo è, in entrambi i casi, visualizzare oggetti virtuali lasciando all'utente la possibilità di vedere il mondo reale. Come vedremo, è proprio la modalità di visualizzazione del mondo reale che rende i due sistemi differenti.

## OPTICAL SEE THROUGH

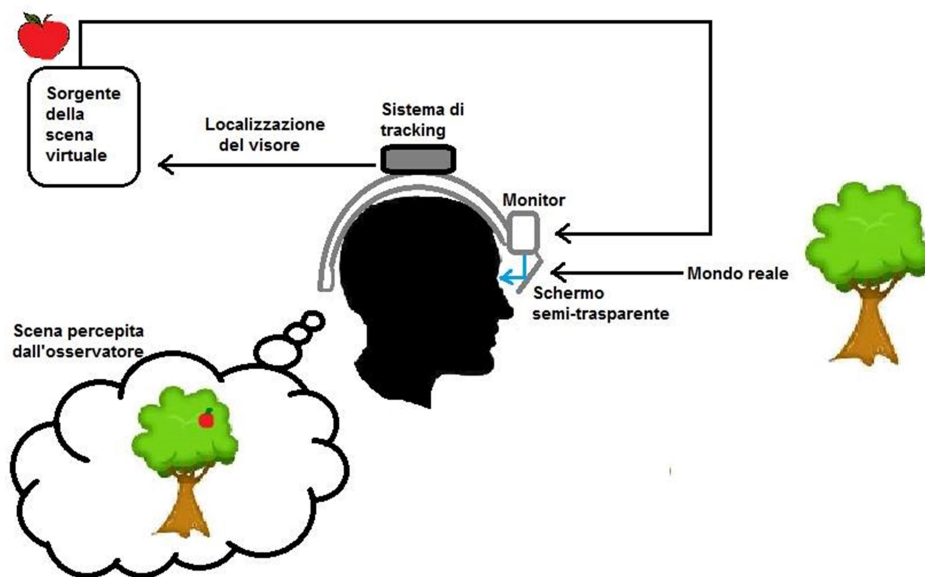
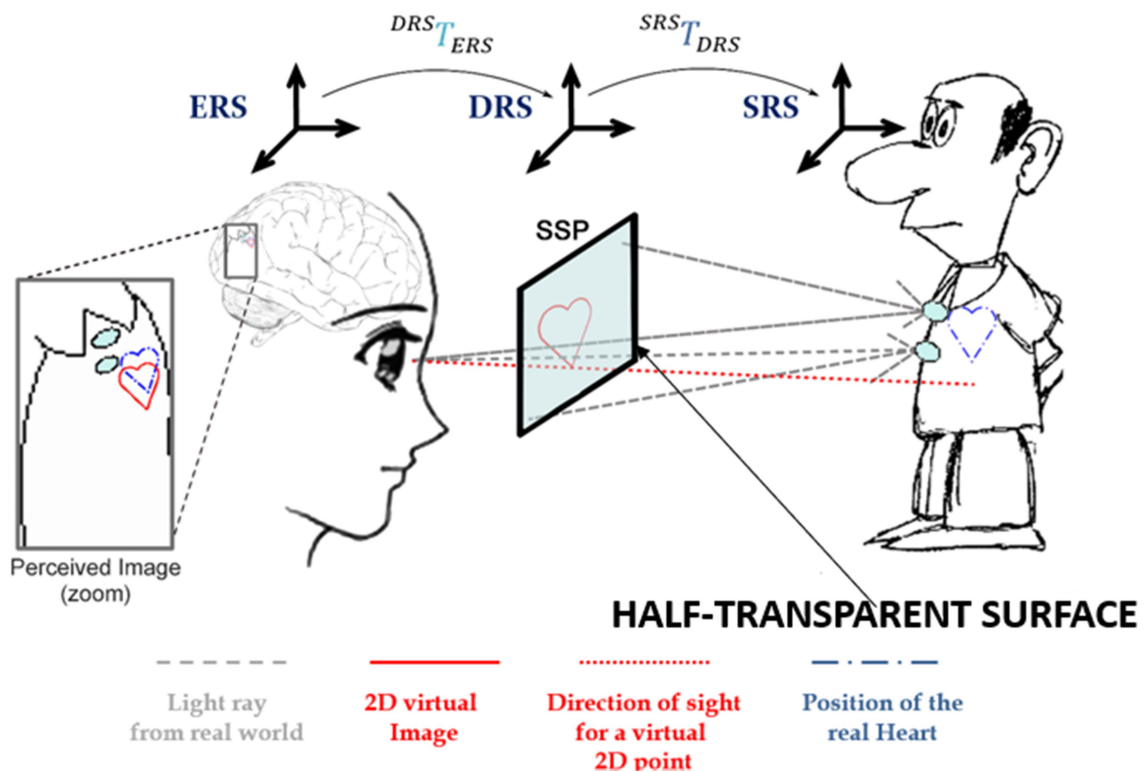


Fig. 11: Paradigma Optical See-Through

Gli HMD che implementano il paradigma optical see-through sono realizzati con un combinatore di fascio ottico costituito, ad esempio da uno specchio semitrasparente, che in parte trasmette e in parte riflette la luce: la luce proveniente dall'ambiente deve essere trasmessa in modo che l'utente possa vedere gli oggetti del mondo reale, mentre la luce che proviene dal micro display (chiamato monitor in figura) deve essere riflessa per poter permettere la visualizzazione degli oggetti virtuali.

Questi sistemi sono utilizzati per vedere in trasparenza la scena reale e, allo stesso tempo, riflettere le immagini virtuali sugli occhi dell'utente ottenendo come effetto la visione del mondo reale in maniera diretta combinato con quello virtuale. Questa soluzione costituisce una modalità visiva del tutto naturale del mondo reale per l'osservatore (seppur attraverso un mezzo ottico semitrasparente). La superficie semitrasparente può trovarsi anche molto vicina all'occhio e questo renderebbe impossibile una corretta messa a fuoco da parte dell'utente (come sappiamo esiste una distanza minima alla quale l'occhio è capace di mettere a fuoco e tale distanza minima aumenta con l'avanzare dell'età). Per ovviare a questo problema un sistema di lenti fa sì che l'immagine virtuale sia proiettata in avanti ad una precisa distanza (che varia in funzione dell'HMD). Un HMD optical see through, per quanto descritto finora, sembrerebbe essere la soluzione migliore da adottare in un sistema di realtà aumentata in ambito chirurgico. Il problema principale che si incontra nell'impiego di un dispositivo di questo tipo consiste nella difficoltà di rendere coerenti le due scene: l'operazione di registrazione virtuale-reale diventa un punto critico ed estremamente delicato, soprattutto se si pensa ad un'applicazione chirurgica in cui una sovrapposizione erronea tra le due informazioni potrebbe causare seri danni. L'informazione virtuale deve essere coerente con la scena vista direttamente dall'occhio dell'utente. Una corretta registrazione richiede in questo caso tre accorgimenti fondamentali:

1 - Tracciamento dell'HMD rispetto al sistema di riferimento della scena

2 - Frequente ricalibrazione per stimare la posa della superficie semi-trasparente dell'HMD rispetto all'occhio dell'utente

3 - Definizione di un modello proiettivo del punto di vista virtuale consistente con il modello proiettivo dell'occhio umano

Dalla fig. 11 si evince che per una corretta registrazione è necessario calibrare la posizione del visore rispetto alla scena reale e del visore rispetto all'occhio dell'utente (più precisamente rispetto al primo punto nodale dell'occhio). La posizione relativa tra il display e l'occhio gioca un ruolo fondamentale nella percezione che l'utente ha dell'allineamento virtuale-reale soggetta a problematiche di parallasse che possono essere risolte solo conoscendo in maniera esatta, istante per istante, la trasformazione tra i due sistemi di riferimento presi in considerazione.

Inizialmente, i metodi di calibrazione dei sistemi optical see-through richiedevano all'utente che indossava il visore di eseguire frequenti procedure di calibrazione offline basate sull'allineamento di marker reali con marker virtuali in posizioni note per ricavare la trasformazione occhio-display. Ad un minimo spostamento del display l'intera procedura doveva essere, pertanto, rieseguita per

ottenere nuovamente la calibrazione. Per risolvere questo problema attualmente si sta cercando di integrare all'interno dei visori optical see-through una piccola telecamera in grado di tracciare la posizione dell'occhio. Inoltre, per avere una corretta registrazione sarebbe necessario conoscere il modello proiettivo dell'occhio umano per definire correttamente il modello proiettivo del punto di vista virtuale. Bisogna a questo punto tener conto di diversi fattori legati alla morfologia e alla fisiologia dell'occhio come ad esempio l'accomodamento: quando infatti si vuole mettere a fuoco oggetti posti ad una certa distanza il cristallino si deforma in modo da cambiare la lunghezza focale del nostro sistema ottico andando così a variare quelli che sono i suoi parametri intrinseci. Per questi motivi i visori optical see-through non sono ancora pienamente sviluppati per poter fare il loro ingresso in sala operatoria. Un loro impiego realistico in ambito chirurgico potrebbe consistere nel veicolare informazioni utili al chirurgo in real-time ma che non necessitino di una coincidenza spaziale estremamente accurata con il mondo reale. In questo modo il chirurgo potrebbe ad esempio evitare di distogliere lo sguardo dalla sede dell'intervento per guardare informazioni su un monitor in sala operatoria: informazioni come battito cardiaco o altri parametri fisiologici ed altre informazioni possono essere direttamente proiettate sul visore.

## VIDEO SEE THROUGH

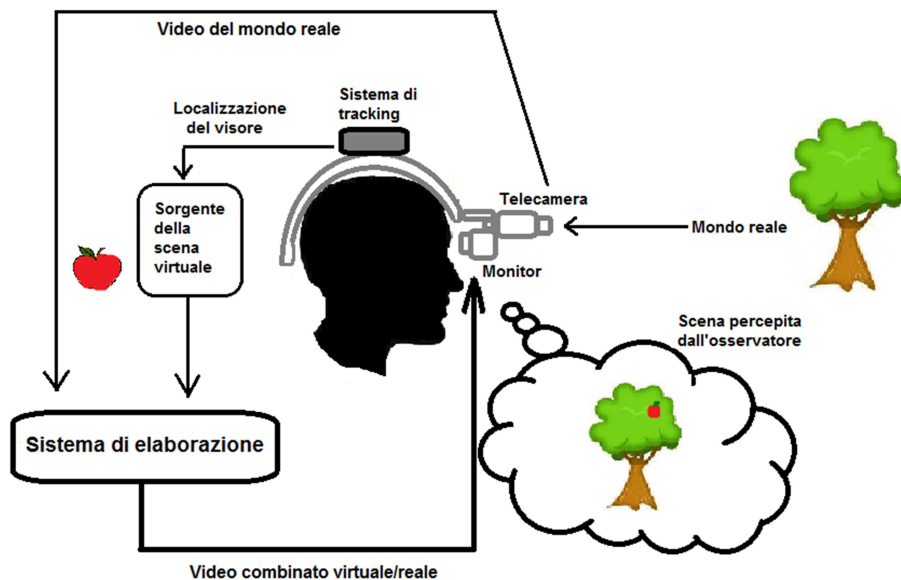
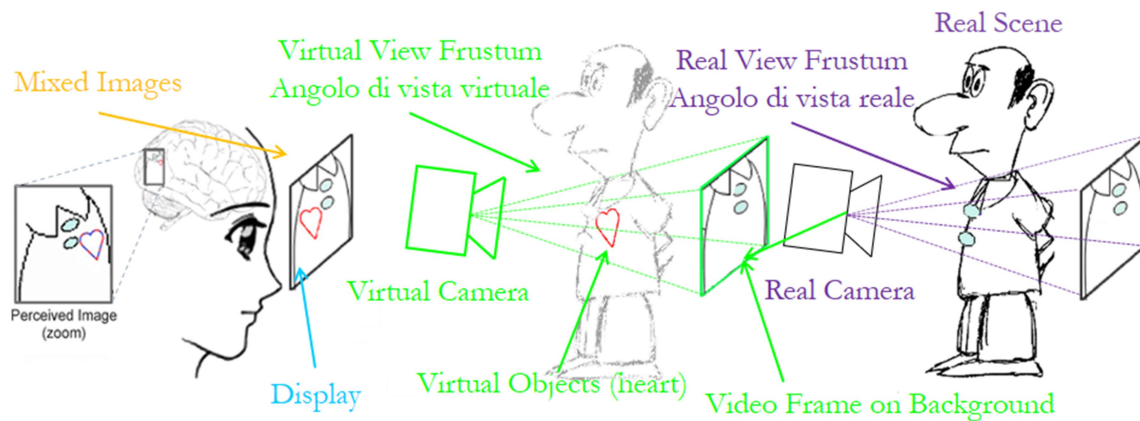


Fig. 12: Paradigma Video See-Through

I sistemi video see-through, contrariamente a quelli optical see-through, riprendono il mondo reale grazie alla presenza di camere montate esternamente ad visore non trasparente. Il rendering degli oggetti virtuali è combinato la scena ripresa dalle camere ed infine mostrato sul visore. L'utente non guarda più il mondo con i suoi occhi ma attraverso camere che proiettano le immagini del mondo reale sui display posti davanti agli occhi dell'utente (sui quali si proietta anche l'immagine virtuale). Lo stesso principio di funzionamento si ritrova nei sistemi di realtà aumentata implementati su smartphone, tablet o anche schermi in sala operatoria sui quali l'immagine ripresa da un endoscopio all'interno del paziente è arricchita da elementi virtuali. Nei sistemi video see-through l'informazione virtuale è sempre coerente con quella reale indipendentemente dal movimento relativo display-utente o dal livello di accomodamento dell'occhio dell'utente. Per questi motivi un HMD video see-through invade maggiormente il naturale senso visivo dell'utente in cambio di una fusione più coerente del virtuale con il reale. L'implementazione di un sistema video see-through (mostrato in Fig. 12) richiede i seguenti accorgimenti per operare una corretta registrazione:

1 – Operare una calibrazione intrinseca: modellare la telecamera virtuale esattamente con gli stessi parametri del modello di proiezione della telecamera reale, facendo cioè coincidere parametri intrinseci (angoli di vista verticali e orizzontali, centri di proiezione e coefficienti di distorsione).

2 – Posizionare nello scenario virtuale la camera virtuale replicando la posa della telecamera reale rispetto agli altri elementi della scena reale. In particolare, posizionare la camera virtuale tenendo conto della/delle relazioni con i sistemi di riferimento dei dispositivi di tracking impiegati.

3 – Posizionare gli oggetti virtuali sulla base delle informazioni acquisite dai sistemi di tracking.

Le prime due condizioni possono essere soddisfatte operando una calibrazione offline mentre la terza è legata alla modalità di tracking scelta.

In questo modo, per ogni coppia di pixel corrispondenti sulla camera reale e su quella virtuale si può ottenere perfetta coerenza tra le due rette di proiezione (virtuale e reale) e quindi una perfetta corrispondenza dell'informazione virtuale rispetto a quella reale qualunque sia la posizione desiderata per gli oggetti virtuali e qualunque sia la posizione della camera reale.

## **Confronto tra i paradigmi Optical See-Through (OST) e Video See-Through (VST)**

Dopo aver descritto i due paradigmi per quanto concerne le procedure di registrazione virtuale-reale, consideriamo ora quali sono (oltre a quelli già evidenziati) i vantaggi e gli svantaggi legati all'utilizzo delle due

Sicuramente il principale vantaggio di un sistema OST consiste nella visualizzazione diretta del mondo reale (seppur attraverso elementi ottici semitrasparenti), senza la mediazione di una camera. Nel sistema VST la camera che si interpone tra l'occhio dell'utente e la scena comporta una ridotta qualità della visione del mondo reale a causa del processo di pixellizzazione che impone una certa risoluzione data dal sensore di cui la telecamera è provvista (oltre ad altre aberrazioni come quelle cromatiche...).

In modalità VST è potenzialmente possibile rendere campi di vista di dimensioni maggiori, mentre in OST il campo di vista è limitato dalle dimensioni dello schermo semitrasparente che costruttivamente non possono essere ampi come nel caso dei VST.

In entrambi i casi, un altro aspetto importante riguarda la latenza che intercorre tra l'istante in cui avviene il tracking di tutti gli elementi e l'istante in cui viene presentata all'utente l'informazione virtuale: avremo una certa latenza e rappresenta una delle maggiori cause di imperfetta registrazione nell'utilizzo di HMD [Rolland, 2000].

Nella trattazione

Nei sistemi VST è possibile distinguere due casi:

- se si utilizza un tracking cosiddetto video-based, la scena reale è ripresa ad intervalli tempo in funzione del frame rate della camera. A questo contributo alla latenza totale, si deve poi aggiungere il tempo richiesto per localizzare gli oggetti a partire dalle immagini ed il tempo necessario al rendering (che può partire solo a tracking effettuato). Se l'utente inquadra una nuova scena potrà ricevere subito le nuove immagini del mondo reale ma dovrà passare un certo intervallo temporale prima che gli oggetti virtuali assumano coerenza rispetto alla scena inquadrata. In questo caso, per avere sempre coerenza tra immagini reali e virtuali è possibile ritardare la riproduzione della scena reale, del tempo richiesto per il tracking ed il rendering. In questo modo si ha il vantaggio di fornire delle informazioni coerenti tra reale e virtuale, ma si aumenta il ritardo tra il tempo reale e la riproduzione sullo schermo.














- Utilizzando un sistema di tracking esterno, con una frequenza di localizzazione superiore rispetto a quella di refresh della camera, si avrà solo la latenza dovuta al tempo d'acquisizione della camera ed eventualmente del rendering (se questo è più lento della camera).

Nel caso OST, l'informazione reale è percepita istantaneamente, mentre quella virtuale è mostrata dopo un periodo di latenza, dato dal tempo necessario per il tracking ed il rendering, che determina una discrepanza tra la scena reale e quella sovrapposta virtualmente, distruggendo così, in caso di movimenti angolari veloci, l'illusione di una coerenza degli oggetti virtuali nell'ambiente reale circostante.

Come visto, nei sistemi OST una corretta registrazione richiede la conoscenza di diverse informazioni riguardanti l'occhio dell'utente mentre nel caso di VST questo problema non si manifesta in quanto è il punto di vista della camera a determinare ciò che l'utente può visualizzare. Tuttavia, nei sistemi VST l'utente vede il mondo reale da un punto di vista che non è quello dell'occhio ma quello della camera. Se la scena inquadrata dalla camera differisce molto da quella che l'utente vedrebbe ad occhio nudo, si possono avere difficoltà di coordinazione occhio-mano.



Tabella riassuntiva dei principali vantaggi e svantaggi legati all'utilizzo di sensori per realtà aumentata che implementano la modalità Optical See-Through (OST) o Video See-Through (VST)

| OPTICAL SEE THROUGH (OST)   | VIDEO SEE THROUGH (VST)   |
|---|---|
| <p><b>Perfetta visione del mondo reale.</b></p>    | <p>Ridotta qualità di visione del mondo reale.</p>  |
| <p>Limite tecnologico nel realizzare display di grandi dimensioni: campo di vista limitato</p>   | <p><b>Campo di vista aumentato può essere di dimensioni maggiori.</b></p>    |
| <p>Contenuto virtuale deve essere più luminoso della scena reale per essere visibile.</p>    | <p><b>Pieno controllo della fusione reale-virtuale a livello di pixel.</b></p>   |
| <p><b>Fornisce un'esperienza visiva naturale per l'osservatore</b></p>    | <p>La percezione dell'osservatore non è naturale e possono sorgere problemi di propriocezione nell'interazione con l'ambiente circostante</p>  |
| <p>Le immagini reali sono percepite istantaneamente e possono essere troppo in anticipo rispetto alla comparsa dell'informazione virtuale</p>  | <p><b>Le immagini reali possono essere ritardate per ridurre il lag relativo virtuale-reale</b></p>    |
| <p>La trasformazione eye-to-display deve essere stimata (calibrazione user-specific).</p>    | <p><b>Per una corretta registrazione è sufficiente calibrare la camera, non la retina!</b></p>   |
| <p><b>Interruzione del segnale non significa perdita vista reale.</b></p>    | <p>Interruzione del segnale significa oscurare la vista.</p>   |