

# Capitolo 1

## Interfacce uomo-macchina nella Realtà Virtuale

*José A. Iglesias Guitián*<sup>1</sup>

*Visual Computing Group, CRS4*

*Marco Agus*<sup>2</sup>

*Visual Computing Group, CRS4*

Questo capitolo fornisce una descrizione dei principali elementi che influenzano l'interazione uomo-macchina in riferimento alla realtà virtuale, per come si configurano attualmente, e per come si prevede si svilupperanno in un prossimo futuro. Il capitolo è organizzato nel modo seguente: la sezione 1.1 presenta il concetto di realtà virtuale soprattutto in relazione alle possibilità offerte per quanto riguarda l'interazione tra uomo e macchina, ed alle applicazioni di nuova generazione. La sezione successiva descrive i principali requisiti ed i vincoli che un sistema di realtà virtuale deve soddisfare per riuscire a fornire all'utente un'impressione convincente e delle esperienze realmente immersive. La sezione 1.3 si concentra sul feedback sensoriale principale, descrivendo le principali tecnologie di nuova generazione per la realizzazione di dispositivi in grado di fornire delle sensazioni visive e tattili estremamente realistiche. Infine la sezione 1.4 descrive brevemente alcuni esempi di applicazioni di realtà virtuale realizzate dagli autori, nel campo della simulazione chirurgica, dei musei virtuali e dei sistemi di visualizzazione autostereoscopici multiutente, e la sezione 1.5 discute brevemente la situazione attuale ed il potenziale futuro della disciplina.

### 1.1 Introduzione

Realtà virtuale (in inglese *virtual reality*, abbreviato VR) è il termine utilizzato comunemente per indicare una realtà sintetica simulata attraverso l'ausilio del computer. A livello teorico, la realtà virtuale dovrebbe essere realizzata attraverso un sistema totalmente immersivo in cui tutti i sensi umani sono coinvolti (più specificamente realtà virtuale immersiva o RVI). Tuttavia, allo stato attuale il termine è applicato solitamente a qualsiasi tipo di simulazione virtuale creata attraverso l'uso del computer, dai videogiochi che vengono visualizzati su un normale schermo, alle applicazioni che richiedono l'uso di appositi sensori. Da un punto di vista commerciale si può dire che già a partire dagli anni 80, la VPL Research, fondata da Jaron Lanier, vendeva prodotti e dispositivi specifici per la realtà virtuale.

La realtà virtuale, per sua stessa definizione, simula il più realisticamente possibile la realtà effettiva. In pratica però, per problemi tecnologici (tra cui la limitata capacità di calcolo degli attuali sistemi informatici) non è ancora stato raggiunto un livello di realismo così elevato da

---

<sup>1</sup>jalley@crs4.it

<sup>2</sup>magus@crs4.it

rendere indistinguibile l'ambiente simulato da quello reale. La quasi totalità di questi ambienti virtuali rimangono prevalentemente limitati ad esperienze visive e sonore. Dal punto di vista delle applicazioni, gli ambienti virtuali vengono al momento programmati per alcune categorie di utenti, come ad esempio i piloti di aerei che utilizzano questa tecnologia per prepararsi al volo, oppure i chirurghi che fanno pratica su determinate procedure operatorie. Alcuni prevedono che una vera e propria commercializzazione di massa della realtà virtuale immersiva si avrà ottimisticamente nel corso del XXI secolo. Nel corso di questo capitolo vengono descritte le origini del concetto di realtà virtuale, e quali sono i vari problemi affrontati dalla comunità scientifica ed ancora da risolvere soprattutto in relazione agli aspetti legati all'interazione uomo-macchina.



Figura 1.1: Il primo prototipo di setup per realtà virtuale, creato da un team guidato da Ivan Sutherland. Fonte: [www.flickr.com](http://www.flickr.com) con licenza Creative Commons (CC) [1].

### 1.1.1 Background e motivazione

Per quanto riguarda le origini del concetto di realtà virtuale, esse possono essere fatte risalire alla pubblicazione dell'articolo "The Ultimate Display" [77], nel quale Ivan Sutherland per primo introdusse i concetti chiave di immersione in un mondo simulato, e di scambio sensoriale completo, che rappresentano la base dell'attuale ricerca nel campo della realtà virtuale. All'interno dell'articolo in questione, la sfida di ricerca venne lanciata attraverso la seguente metafora:

*Lo schermo è una finestra attraverso la quale uno può vedere un mondo virtuale. La sfida è fare in modo che quel mondo appaia reale, si comporti in modo reale, emetta suoni reali, e si senta reale. [77].*

Tale affermazione, che può essere interpretata come una sfida a trovare metodi per simulare la presenza degli utenti che funzionino come metafore di interfaccia verso un mondo sintetico, è diventata punto di riferimento per la ricerca da parte di una comunità crescente di ricercatori e industrie. La motivazione per tale direzione di ricerca è duplice. Da un punto di vista evolutivo, la realtà virtuale è considerata come un modo per superare le limitazioni delle interfacce standard uomo-macchina; mentre da un punto di vista rivoluzionario, la tecnologia realtà virtuale apre la porta a nuovi tipi di applicazioni che sfruttano le possibilità offerte dalla simulazione di presenza.

## 1.1.2 Nuovi metodi di interazione



Figura 1.2: **Evoluzione delle interfacce.** Sinistra: metafora desktop popolare nei PC. Centro: iPhone della Apple. Destra: interfaccia Wii della Nintendo. Fonte: [www.flickr.com](http://www.flickr.com) con licenza CC [1].

Nel corso degli ultimi decenni si è assistito ad un'enorme crescita dell'utilizzo del computer come strumento d'ausilio e di supporto per quasi tutte le attività umane. Una delle principali ragioni di tale sviluppo è stata l'introduzione di interfacce human-friendly che hanno reso i computer facili da usare e da apprendere. Attualmente sempre più device incorporano interfacce piuttosto complesse che abilitano l'utente ad evidenziare, spostare e modificare i contenuti semplicemente attraverso movimenti delle dita su uno schermo. A titolo di esempio, lo smart phone iPhone [4] possiede un'interfaccia in grado di simulare la fisica di oggetti 3D reali ed il display è inoltre collegato a diversi sensori: un sensore di vicinanza per spegnere il display ed il touchscreen in modo da risparmiare energia e prevenire input involontari, un sensore di luce ambientale per regolare la luminosità del display, ed infine un accelerometro a 3-assi per misurare l'orientazione del telefono e modificare il contenuto visualizzato in modo appropriato. D'altra parte, queste nuove interfacce sono delle naturali evoluzioni del paradigma di interfaccia utente che maggiormente ha avuto successo nel corso degli anni: ovvero la metafora desktop ideata da Xerox Parc che è stata poi resa popolare tra gli utenti dei PC dalla Macintosh. In ogni caso, mentre la metafora desktop è sicuramente appropriata per l'interazione con mondi bidimensionali, inizia a mostrare limitazioni quando la si utilizza per interagire con mondi tridimensionali. Infatti, i maggiori difetti di questa soluzione sono l'assenza di correlazione tra manipolazione ed effetto ed allo stesso tempo il grado elevato di separazione cognitiva tra gli utenti ed i modelli con cui stanno interagendo [23, 36, 35]. Allo stato attuale, prodotti come iPhone della Apple o la console Wii della Nintendo hanno reso comune l'utilizzo di accelerometri e misuratori di orientazione come nuovi dispositivi di input che arricchiscono le possibilità di interazione tra l'uomo e il computer. Il feedback fornito agli utenti rappresenta però anche un problema: le limitate informazioni sulla struttura del mondo tridimensionale che vengono ricostruite a partire da un'immagine visiva fissa costringono spesso l'applicazione ad utilizzare molteplici viste per poter fornire informazioni di profondità aggiuntive. Questo fatto porta gli utenti a combinare viste separate per crearsi un'immagine mentale di oggetti complessi, ed aggiunge ulteriore complessità a questa spesso molto difficile operazione [48] in quanto costringe gli utenti a concentrarsi su come ottenere quello che desiderano piuttosto che sull'operazione stessa. La ricerca sulla realtà virtuale, che parte dal presupposto che gli esseri umani sono ben equipaggiati per interagire col mondo dove vivono, dovrebbe sforzarsi di fare in modo che gli utenti interagiscano con i mondi virtuali allo stesso modo nel quale interagiscono con i mondi reali, in modo da rendere l'interazione la più naturale possibile e da ridurre i tempi e le fasi di addestramento. Il potenziale dei sistemi di realtà virtuale come metafora intuitiva per l'interazione uomo-macchina è pertanto enorme, dal momento che l'utente può sfruttare le

sue abilità cognitive e sensoriali per interagire con il mondo con una grande varietà di modalità sensoriali.

### 1.1.3 Applicazioni di nuova generazione

La realtà virtuale consente agli operatori di compiere operazioni su mondi reali remoti, su mondi sintetici generati al computer, o una combinazione di entrambi. Una definizione di questo tipo rende quasi qualsiasi area di attività umana adatta ad una rappresentazione mediante realtà virtuale [40]. Nel seguito, descriviamo brevemente le più diffuse.

#### Prototipazione Virtuale

Quando si parla di progetti ingegneristici a larga scala, la fase più importante è quella di design, ed anche la più delicata a causa dei possibili drammatici effetti sui risultati finali. La Prototipazione Virtuale consente ai progettisti di testare e migliorare i propri progetti allo stesso modo di quello che possono ottenere utilizzando dei plastici, ma in modo più rapido e con maggiore flessibilità anche per quanto riguarda le collaborazioni in remoto, ed inoltre con una notevole riduzione dei tempi e dei costi [12].



Figura 1.3: Visualizzazione del modello CAD del Boeing 777 attraverso tecniche di multirisoluzione sviluppate dal CRS4.

Da questo punto di vista, l'esplorazione di costruzioni architettoniche ha rappresentato nel corso degli ultimi anni una delle applicazioni di realtà virtuale dal maggior successo. Questi tipi di sistemi consentono all'architetto di prototipare un edificio e di scambiare informazioni ed opinioni con il cliente in modo tale da affinare i dettagli del progetto ed inserire gli elementi desiderati [18, 11]. In un tentativo di migliorare i sistemi CAD tradizionali, grossi progetti ingegneristici si sono spesso accompagnati con lo sviluppo di strumenti di prototipazione virtuale [30]. Esempi di questo tipo sono il dimostratore ISS VR utilizzato da Rolls-Royce per dimostrare la facilità di assemblaggio e di manutenzione di un motore [42] ed il sistema di visualizzazione ad alte prestazioni della Boeing, utilizzato per il design del modello 777 [63] (si veda in figura 1.3 una visualizzazione del modello CAD del Boeing 777 attraverso un dimostratore realizzato al CRS4 [39]). Inoltre, l'agenzia spaziale francese (CNES) e CISI hanno congiuntamente lanciato il progetto di ricerca PROVIS nel 1995 per sviluppare soluzioni per i progettisti di satelliti per creare, manipolare e studiare i loro modelli utilizzando plastici digitali, mentre il CRS4 ed il CERN hanno congiuntamente sviluppato il sistema i3d per supportare il design del Large Hadron Collider del CERN [13, 14, 37, 38]. Tutti questi sforzi mostrano l'interesse nei confronti della prototipazione virtuale interattiva come strumento di testing iniziale dei progetti. Nel corso degli ultimi anni, gli sforzi di ricerca e sviluppo per la costruzione di sistemi prototipazione virtuale hanno avuto origine dalle esigenze di progetti specifici. Ricerche in corso al centro Fraunhofer per la ricerca in Computer Graphics hanno come oggetto l'integrazione di strumenti esistenti per fornire caratteristiche di prototipazione virtuale a sistemi CAD esistenti [52].

Proprio di recente, compagnie come ZCorporation [6] o Dimension [2] hanno immesso sul mercato nuove soluzioni rapide per la prototipazione (si veda figura 1.4). Per esempio, stampanti



Figura 1.4: Stampanti di prototipazione 3D che utilizzano gesso e resina (ZCorporation e Stratasys).

3D a colori ad alta definizione, che creano prototipi fisici 3D attraverso la solidificazione mediante un legante liquido di strati di polvere di gesso depositata (figura 1.4). Altri dispositivi che vengono comunemente usati per la prototipazione virtuale rapida sono gli scanner real-time, che usano tre camere CCD ad alta velocità ed un'unità di proiezione laser per triangolare le posizioni degli oggetti a partire da una serie di target posizionati in modo casuale. In figura 1.5 vengono mostrati alcuni modelli prototipati attraverso una stampante 3D dopo essere stati scannerizzati con uno scanner laser. Infine, un esempio recente di applicazione della Prototipazione Virtuale è rappresentato dalla progettazione della nuova Nissan Micra CC convertibile. La creazione dell'automobile ha riguardato la realizzazione di nuovi paraurti anteriori e posteriori e portiere, ed una ri-decorazione delle parti esistenti. Per la creazione delle nuove parti, la compagnia inglese Ogle Models and Prototypes [5] ha avuto a disposizione i dati completi della superficie ed ha fatto un certo numero di tentativi prima che i dati finali per la lavorazione fossero rilasciati. I risultati furono presentati in tempo utile e secondo la stima iniziale di spesa al Motor Show di Francoforte del 2008. La stessa compagnia ha inoltre in passato partecipato alla manifattura di canoe in composito ed alla realizzazione dell'apparecchio aereo TriStar C Mk 2.



Figura 1.5: Esempi di modelli stampati con una stampante 3D.

### Simulatori e addestramento

Uno degli aspetti principali della realtà virtuale è che l'utente può sfruttare le abilità cognitive o motorie per interagire con il mondo attraverso una certa varietà di modalità sensoriali e, in molti

casi, l'esperienza ottenuta negli ambienti virtuali può essere direttamente trasferita al mondo reale. Questi aspetti sono stati sfruttati a pieno nella realizzazione di diversi simulatori e sistemi di addestramento. A tal proposito, esistono molte applicazioni di ricerca ed industriali in diversi ambiti come la simulazione di volo [65, 66, 67], la simulazione di guida [65, 66, 67], e la simulazione chirurgica [86, 88, 9, 8]. Nella sezione 1.4 verranno descritti con maggior dettaglio gli aspetti riguardanti la simulazione chirurgica, con riferimento ad alcuni sistemi sviluppati dagli autori.

### Telepresenza e teleoperazione

Ambienti ostili (ad esempio impianti nucleari danneggiati o pianeti) rendono difficile o impossibile agli esseri umani le operazioni di esplorazione o manutenzione. D'altra parte, per quel che si può prevedere del futuro, i robot non saranno abbastanza intelligenti ed evoluti da operare in completa autonomia, ma richiederanno l'intervento dell'operatore per compiere operazioni in situazioni mutevoli o imprevedibili. La telepresenza ha lo scopo di simulare la presenza di un operatore in un ambiente remoto per supervisionare il funzionamento di una determinata piattaforma remota e compiere delle operazioni attraverso il controllo di robot remoti. Nelle modalità di controllo di supervisione, un'interfaccia di realtà virtuale fornisce all'operatore diversi punti di vista dell'ambiente di lavoro remoto in un formato multi-display che può essere riconfigurato a seconda delle esigenze del momento. L'operatore può investigare il sito remoto sia attraverso delle tecniche di volo libero che attraverso delle camere montate sul telerobot. Per compiere delle operazioni remote che non possono essere fatte autonomamente dai robot, l'operatore può ricorrere al controllo interattivo. In questa modalità di telepresenza, all'operatore viene dato un sufficiente feedback sensoriale per approssimare la sua presenza effettiva nel sito remoto. Ad esempio il display stereoscopico dell'operatore è direttamente collegato al sistema della camera 3D del robot ed il suo braccio è reso spazialmente coerente rispetto al braccio del robot. I primi lavori in quest'area includono l'applicazione prototipale di telepresenza NASA Ames, dove l'operatore interagisce con un ambiente dove si svolge un'operazione telerobotica simulata [34]. Una delle applicazioni maggiormente avanzate di questa tecnologia è la chirurgia remota [25, 59].

### Realtà aumentata

Le nuove frontiere della tecnologia della realtà virtuale è la cosiddetta realtà aumentata. In tali sistemi il mondo virtuale è sovrainciso sul mondo reale, con lo scopo di fornire utili informazioni aggiuntive, come per esempio, una guida nella realizzazione di operazioni nel mondo reale. Soltanto di recente le potenzialità dell'elaborazione video in tempo reale, i sistemi di computer graphics e le nuove tecnologie di display hanno trovato una direzione di convergenza per rendere il display di un'immagine grafica virtuale registrato il più possibile in modo corretto rispetto ad una vista dell'ambiente 3D. I ricercatori che lavorano nei sistemi di realtà aumentata, propongono soluzioni in molti domini applicativi, compreso l'addestramento militare [80], i sistemi medici [75, 71, 76], la progettazione ingegneristica [10], la robotica [29], e la manifattura, la manutenzione e la riparazione [41, 32].

## 1.2 Caratteristiche e requisiti

L'obiettivo della realtà virtuale è quello di inserire l'utente all'interno di un sistema a retroazione rappresentato da una applicazione in tempo reale, in modo che si trovi immerso all'interno di un mondo che può essere sia autonomo che influenzabile dalle sue azioni. I requisiti per le applicazioni di realtà virtuale sono definiti attraverso le analisi delle necessità in termini di canali di input ed output per il simulatore del mondo virtuale.

### 1.2.1 Feedback sensoriali principali

I canali di input di un'applicazione di realtà virtuale sono quelli attraverso i quali gli utenti emettono informazioni ed interagiscono con l'ambiente. Noi interagiamo con il mondo principal-

mente attraverso la locomozione e la manipolazione, e comunichiamo informazioni principalmente attraverso la voce, la gestualità e le espressioni facciali [15].

### Percezione visiva

La vista è generalmente considerata il senso dominante, ed è unanimemente accettato che la percezione umana è orientata attorno alla visione [56]. Gli aspetti principali del senso visivo che hanno un impatto sui requisiti del display sono i seguenti:

- **percezione di profondità:** la visione stereoscopica è un meccanismo visuale umano primario per la percezione della profondità. Tuttavia, dal momento che gli occhi dell'uomo si trovano distanziati in media di 6.3 cm, i benefici geometrici dovuti alla stereopsi vengono persi per oggetti più distanti di 30 metri. La percezione della profondità è molto più efficace per oggetti a distanze molto più vicine. Altri aspetti primari (convergenza degli occhi ed accomodazione) ed aspetti secondari (ad esempio visione prospettica, parallasse, dimensione, tessitura, illuminazione ed ombre) sono essenziali per oggetti lontani e di importanza variabile per quelli vicini;
- **accuratezza e campo di vista:** il campo di vista orizzontale di entrambi gli occhi umani è di circa 180 gradi senza muovere occhi o testa e di 270 gradi con la testa fissata e muovendo gli occhi. Il campo di vista verticale è tipicamente oltre i 120 gradi. Mentre il campo totale non è necessario per un utente per sentirsi immerso in un ambiente virtuale, un intervallo tra 90 e 110 gradi viene considerato necessario per il campo di vista orizzontale [87]; quando si considera l'accuratezza, la fovea centrale di un occhio umano possiede una risoluzione di circa 0.5 minuti di arco [51];
- **frequenza critica di fusione:** le simulazioni visive generano l'illusione di animazione attraverso la presentazione rapida successiva di una sequenza di immagini statiche. La frequenza di fusione critica è la frequenza sopra la quale gli uomini non sono in grado di distinguere tra successivi stimoli visivi. Questa frequenza è proporzionale alla luminanza ed alla dimensione dell'area dell'immagine coperta sulla retina [26, 57]. Valori tipici per scene normali sono tra i 5 ed i 60 Hz [87]. Una regola pratica comunemente accettata dall'industria della computer graphics suggerisce che, sotto i 10–15 Hz, gli oggetti non appaiono in movimento fluido, causando distrazione o fatica da parte dell'utente [62]. Applicazioni ad alta velocità, come simulatori di volo professionali, richiedono frequenze visive di feedback di più di 60 Hz [19].

### Percezione sonora

La vista è il nostro mezzo di percezione privilegiato, mentre l'udito viene principalmente utilizzato per la comunicazione verbale, per ottenere informazioni da parti invisibili del mondo o quando la visione non fornisce abbastanza informazioni. Negli uomini, l'apparato uditivo è più efficiente tra i 1000 ed i 4000 Hz, con una caduta di efficienza al salire o scendere della frequenza [87].

### Percezione della posizione, del tatto, e della forza

Mentre i sistemi visivo ed uditivo sono solo in grado di percepire, il senso del tatto è in grado sia di sentire cosa sta succedendo attorno all'essere umano, ma anche di agire all'interno dell'ambiente. Questo fatto lo rende una parte indispensabile di molte attività umane e così, per fornire il realismo necessario per applicazioni efficienti, i sistemi di realtà virtuale devono fornire input di tipo tattile e devono poter riflettere gli output del sistema tattile. Le variabili primarie di input/output per il senso tattile sono spostamenti e forze. Due aspetti importanti nella simulazione di forza che hanno un impatto sui requisiti di un sistema di realtà virtuale sono la massima forza ottenibile e la frequenza del ritorno di forza. Questi due valori dipendono pesantemente dall'applicazione, ed il settore di ricerca riguardante i fattori umani legati a questi argomenti è attualmente molto battuto [87]. Valori tipici per simulare l'interazione con una buona varietà di oggetti è almeno 10 N a 1000 Hz [87]. Un'altra importante variabile da tendere in considerazione negli ambienti di

realtà virtuale è la capacità umana di percepire il movimento e controllare la postura (orientazione e bilanciamento).

### 1.2.2 Realismo Spazio-temporale e rendering in tempo reale

Le applicazioni di realtà virtuale tipicamente offrono molteplici modalità di input/output, e per ognuna di queste modalità dei vincoli temporali devono essere rispettati per fare in modo che queste applicazioni siano utilizzabili (ad esempio la frequenza di ritorno delle immagini deve essere superiore ai 10 Hz, o la frequenza di ritorno di sensazioni tattili deve essere superiore a 1000 Hz). I vincoli di feedback visivo introducono il concetto di rendering in tempo reale, che riguarda la costruzione rapida di immagini attraverso il computer. Questa è l'area di maggiore fermento nel settore della computer graphics e l'obiettivo principale consiste nel produrre una sequenza di immagini e le reazioni conseguenti da fornire all'utente ad una velocità abbastanza elevata da fare in modo che l'osservatore non veda immagini singole ma piuttosto si senta immerso in un processo dinamico. Questa frequenza limite viene generalmente tollerata quando non è inferiore ai 15 Hz, ma la frame rate desiderata per simulatori complessi può superare i 60 Hz. Per un approfondimento sul rendering in tempo reale, il lettore può consultare il libro *Real Time Rendering* di Möller ed al [43].

Vincoli aggiuntivi di performance nelle applicazioni di realtà virtuale derivano dal fatto che output multimodali devono essere integrati in un singolo sistema come espresso da Wloka [83]. L'immersione all'interno di ambienti di realtà virtuale si è dimostrata causare problemi di disorientazione e nausea simili ai sintomi del mal d'aria o mal d'auto, ed è stato dimostrato che i ritardi ed i problemi di sincronizzazione sono i fattori che maggiormente causano questi fastidi [22, 68, 54, 84]. Il realismo spazio-temporale, e riuscire a soddisfare i vincoli di sincronizzazione, ritardo e di accuratezza sono requisiti fondamentali per tutti i sistemi di realtà virtuale. Un workshop ACM CHI sui problemi irrisolti relativi all'interazione 3D [47] ha identificato cinque tipi di requisiti che le interfacce utente 3D devono possedere per sfruttare a pieno le abilità percettive e di coerenza spaziale degli utenti. Questi requisiti possono essere riassunti come segue:

- **Modalità di input ed output multiple ed integrate.** Le interfacce utente dovrebbero essere in grado di sfruttare non solo il canale visivo per le comunicazioni.
- **Fedeltà funzionale.** Considerate nel complesso, le varie informazioni sensoriali fornite da un'interfaccia devono essere adeguate per l'operazione in esecuzione.
- **Velocità di risposta.** Le interfacce utente 3D devono essere molto rapide nel rispondere alle azioni dell'utente in modo che dei comportamenti di tipo esplorativo possano verificarsi in modo naturale. Questo fatto introduce degli importanti vincoli temporali sulle applicazioni.
- **Affordance.** La affordance consente la creazione di oggetti che hanno delle proprietà ricche di significato e forniscono informazioni su come interagire con gli oggetti stessi ed all'interno degli ambienti 3D.
- **Attrazione rispetto alla rappresentazione mentale.** Le interfacce utente devono essere organizzate in modo che siano riconoscibili dall'utente. Metafore di comportamento all'interno di un mondo reale e tecniche di simulazione fisica sono specialmente utili in questo contesto.

Questi requisiti pongono dei problemi da risolvere sia dal lato hardware, in termini di dispositivi che devono essere usati per comunicare con gli utenti, sia dal lato software, in termini di tecniche che devono essere sviluppate per supportare in modo efficiente l'interazione multimodale in un contesto time-critical. Nella sezione seguente di questo capitolo si considerano gli aspetti relativi all'hardware per il feedback sensoriale legato alla vista ed al tatto.

## 1.3 Hardware per il feedback sensoriale

Una volta definiti i vincoli ed i requisiti per la creazione di sistemi di realtà virtuale, in questa sezione vengono presentati i dispositivi di nuova generazione che consentono un feedback sensoriale realistico con gli utenti. Particolare riguardo viene dato ai sistemi per la visualizzazione autostereoscopica multiutente, e per il ritorno di sensazioni tattili, che sono considerati i sensi dominanti per avere l'impressione di essere realmente immersi all'interno di uno spazio virtuale.

### 1.3.1 Ritorno di sensazioni visive

Gli esseri umani si orientano principalmente in relazione al loro senso visivo: essi danno sempre precedenza al sistema visuale nel caso esistano degli input in conflitto provenienti da altre modalità sensoriali. L'obiettivo principale della realtà virtuale per quanto riguarda gli stimoli visivi è quello di fornire la sensazione di una visione stereo. A tal proposito, i display visivi correntemente utilizzati forniscono visione stereoscopica attraverso molte tecniche differenti: display a caschetto (head mounted displays o HMDs), occhiali ad otturatore, occhiali passivi e display olografici autostereoscopici. Un esempio di nuovo tipo di HMD che utilizza varie immagini per occhio è stato di recente proposto da Kim e Son [55].

#### Sistemi autostereoscopici

Negli ultimi anni hanno avuto grande sviluppo i sistemi autostereoscopici multi-utente in cui osservatori ad occhio nudo sono in grado di percepire gli oggetti come se galleggiassero in uno spazio virtuale tridimensionale. Allo stato attuale, la tecnologia dei display ad alta risoluzione è matura ed in grado di riprodurre dei campi di luce naturali [16, 53]. Il problema principale per questi tipi di display resta il rendering, che comporta la generazione di un numero elevato di fasci luminosi aventi adeguata origine, direzione e colore, e questa operazione è allo stato attuale complicata e computazionalmente onerosa. Oltretutto, le caratteristiche ottiche variabili dei display impongono dei metodi di visualizzazione particolari e specializzati. L'elemento chiave caratterizzante i display 3D autostereoscopici è dato dalla possibilità di emettere luce in modo selettivo per quanto riguarda la direzione, e questo viene ottenuto in generale attraverso tre approcci principali: volumetrico, olografico, o multi-view. I display di tipo volumetrico sintetizzano i light field attraverso la proiezione di fasci di luce su mezzi rifrangenti o riflettenti posizionati o mossi nello spazio (come ad esempio [61, 31, 70]).



Figura 1.6: **Display autostereoscopici di nuova generazione.** Alcune immagini di modelli visualizzati su un display di tipo lightfield con parallasse orizzontale basato su tecnologia a proiettori [16].

Esistono anche dei display commerciali, ad esempio quello proveniente da Actuality Systems. In questi tipi di display i principali problemi sono legati alla limitata scalabilità, ed alla difficoltà nel rappresentare effetti di occlusione. Quest'ultimo problema è stato di recente risolto nei display presentati da [53] e [24], che sfruttano un diffusore anisotropico che ricopre uno specchio rotante

ad altissima velocità e sincronizzato con un video proiettore che ne illumina la superficie. Un setup di questo tipo permette una visione di  $360^\circ$ , ma, a causa dei vincoli meccanici, risulta di pratico utilizzo soltanto per dimensioni di immagini limitate e modelli poco complessi. Tecniche puramente olografiche sono invece basate sulla generazione di pattern olografici per ricostruire il fronte d'onda luminoso che si origina a partire dall'oggetto visualizzato, ad esempio, utilizzando materiali acusto-ottici [73], oppure modulatori spaziali di luce [74], oppure ancora dispositivi digitali a micro-specchi [50]. Nonostante questi approcci possano in teoria fornire le immagini più attraenti, il principio stesso su cui si basano impone una serie di limitazioni sulle dimensioni delle immagini, e sulla risoluzione, con conseguente restringimento del campo di vista, ed al costo di una enorme potenza di calcolo richiesta per raggiungere delle accettabili velocità di aggiornamento durante l'interazione. Nei prototipi attualmente a disposizione, ancora confinati all'interno di laboratori di ricerca, la parte hardware del display è molto ingombrante in relazione alla dimensione dell'immagine visualizzata (che è tipicamente di pochi centimetri in ciascuna direzione). Infine i tipici display multi-view, spesso basati su una maschera ottica o un array di lenti lenticolari, mostrano molte immagini 2D in molte zone dello spazio. Essi permettono l'utilizzo a molti utenti simultaneamente, purchè si trovino all'interno di un determinato angolo di vista. Le maschere ottiche utilizzate introducono una significativa perdita di luce quando ci sono più di due viste. Oltretutto, la struttura a barriera diventa visibile man mano che il numero di viste aumenta. D'altro canto, i display lenticolari ingrandiscono la matrice dei pixel dei dispositivi di proiezione creando delle zone oscure tra le posizioni di osservazione. Il display multi-view di Cambridge è un classico esempio di progetto di questo tipo [28], ed un numero di case produttrici (Philips [81], Sharp [85], Opticality [69], Samsung, Stereographics, Zeiss) realizzano monitor basati su variazioni di questa tecnologia. I display tipici allo stato dell'arte usano in genere 8–10 immagini al costo di una limitata risoluzione. Matusik ed al. [60] hanno presentato un prototipo basato su questa tecnologia ed assemblato con 16 proiettori di risoluzione  $1024 \times 768$  ed uno schermo lenticolare. L'effetto stereo 3D è ottenuto quando l'occhio sinistro e l'occhio destro vedono immagini differenti ma corrispondenti. Il numero limitato di viste dei sistemi multi-view basati su maschere o lenti lenticolari produce, tuttavia, delle interferenze e delle discontinuità rispetto al movimento dell'utente [27]. Nella sezione 1.4 verrà descritto un sistema di visualizzazione autostereoscopico multiutente basato su tecnologia a proiettori che permette di ricostruire fedelmente un campo di luce con una parallasse orizzontale [16] (si vedano in figura 1.6 alcune immagini di modelli volumetrici visualizzati su tale display).

### 1.3.2 Ritorno di sensazioni tattili

A partire dall'inizio di questo secolo, sistemi meccanici programmabili ed intelligenti stanno sempre diventando sempre più presenti ed importanti nella vita di tutti i giorni. A tal proposito, un'area di particolare interesse è quella costituita da sistemi meccanici utilizzabili direttamente dall'uomo; tali sistemi condividono uno spazio di lavoro ed interagiscono con l'uomo per completare specifiche operazioni. Nello specifico, molti di questi dispositivi consistono di un meccanismo che viene manipolato fisicamente da un operatore per posizionare una particolare estremità del dispositivo. Il sistema meccanico può semplicemente registrare il percorso dell'estremità o restringere un movimento dell'operatore su un percorso pre-programmato, possibilmente in modo da fornire assistenza allo sforzo dell'operatore. Tali dispositivi sono chiamati **interfacce aptiche** [21]. La parola aptico sta ad indicare qualcosa che è collegato o proviene dal senso del tatto. Un interfaccia aptica è un dispositivo che permette ad un utente di interagire con un computer ricevendo delle sensazioni tattili. Il ritorno di sensazioni è ottenuto applicando una forza che si oppone all'utente lungo gli assi  $x$ ,  $y$ , e  $z$ . Tali dispositivi resistono al movimento umano in certe direzioni, simulando delle barriere o dei vincoli provenienti da un robot manovrato a distanza oppure da un ambiente virtuale programmato [21]. Le interfacce aptiche hanno una grossa gamma di applicazioni, non tutte esplorate a fondo. In effetti, potrebbero essere utilizzate per addestrare abilità fisiche come quei lavori che richiedono speciali abilità manuali su determinati strumenti (ad esempio chirurghi, astronauti, o meccanici), potrebbero essere utilizzate per mettere a disposizione degli strumenti di modellazione solida di oggetti 3D senza utilizzare un mezzo fisico (come i progettisti che lavorano

con i modelli di creta), oppure per realizzare plastici di prototipi di sviluppo [49]. L'esplorazione tattile è un'operazione sensoriale che ha lo scopo di identificare proprietà di superficie e volumetriche. Il sistema sensoriale tattile umano è costituito da due componenti principali: l'informazione tattile e l'informazione cinestetica. Per quanto riguarda l'informazione tattile, i recettori meccanici presenti nel palmo delle dita hanno il ruolo principale, mentre per quanto riguarda l'informazione cinestetica, i recettori sensoriali nella pelle attorno alle articolazioni, le capsule delle articolazioni, i tendini ed i muscoli sono preponderanti. Vari tipi di interfacce sono stati realizzati in industria e come prototipi di ricerca, per cercare di veicolare entrambi i tipi di sensazione. Le interfacce aptiche commerciali di tipo general-purpose utilizzate attualmente possono essere classificate in dispositivi con base d'appoggio (come joystick con ritorno di forza e dispositivi ad articolazioni), dispositivi indissolubili (guanti, abiti, dispositivi eso-scheletrici) o display tattili. I primi due tipi di interfacce aptiche eccitano i sensori cinestetici mentre il terzo tipo (display tattile) eccita i sensori tattili. Un esempio di concetto di interfaccia aptica in cui le forze vengono fornite in determinate parti della mano, è dato da guanto Master II-ND ideato alla Rutgers University, in cui l'uso di pistoni pneumatici consente di minimizzare il peso e pertanto il dispositivo è in grado di simulare la prensione di oggetti virtuali.



Figura 1.7: **Interfacce aptiche.** A sinistra una interfaccia aptica in configurazione seriale **PHANTOM Desktop** comunemente usata per fornire sensazioni alla mano. A destra una interfaccia aptica in configurazione parallela (Delta Force Dimension). Fonte: [www.flickr.com](http://www.flickr.com) con licenza CC [1].

In ogni caso, dal punto di vista delle applicazioni che richiedono ritorno di sensazioni tattili nella mano, le interfacce aptiche che si prestano meglio sono quelle realizzate a partire da una configurazione robotica di tipo seriale o parallelo o ibrida (si vedano in figura 1.7 degli esempi di configurazione seriale (Sensible PHANTOM) e parallela (Delta Force Dimension)). Tra le interfacce aptiche, la più diffusa è il PHANTOM (Personal Haptic Interface Mechanism). Si tratta di un dispositivo che misura la posizione estrema di uno stelo ed esercita un vettore di forza controllato in modo preciso sul medesimo (si veda figura 1.7). Nella sua forma più semplificata, il PHANTOM può essere pensato come un mezzo di trasmissione tra tre motori a spazzola in corrente continua dotati di encoder digitali ed il dito umano. Tale dispositivo viene diffusamente utilizzato per fare in modo che gli utenti interagiscano e sentano un'ampia varietà di oggetti virtuali e può essere inoltre utilizzato per il controllo di manipolatori remoti [78]. Quali che siano i trasduttori ed i sensori elettromeccanici impiegati, uno degli aspetti importanti delle interfacce aptiche è dato dal sistema di calcolo impiegato per guidare i trasduttori. La funzione di questa componente di calcolo è quella di fornire il cosiddetto *haptic rendering*, analogamente a quanto accade con le funzioni di rendering di immagini dei sistemi grafici. L'obiettivo del rendering aptico consiste nel generale segnali rilevanti per una data applicazione. Ad esempio, un determinato modello può essere utilizzato per rappresentare un ambiente, e le sue equazioni possono essere risolte per

trovare delle forze come funzione degli spostamenti e delle loro derivate. Le caratteristiche del sistema tattile umano permettono in alcuni casi di utilizzare dei modelli fisici semplificati per rappresentare oggetti aptici che possono competere in realismo con gli oggetti fisici reali. In altri casi si possono registrare sperimentalmente dei dati che possono essere replicati come funzioni di variabili di stato o del tempo.

Il lettore interessato alle problematiche principali riguardanti il ritorno delle sensazioni tattili può far riferimento al libro di Burdea “Force and Touch Feedback for Virtual Reality” [20].

## 1.4 Esempi di applicazioni di realtà virtuale

Una volta descritti i tipi di requisiti richiesti dalle applicazioni di realtà virtuale, ed i dispositivi di nuova generazione che possono essere utilizzati per il ritorno di sensazioni, in questa sezione vengono presentati alcuni esempi di possibili applicazioni, e descritti brevemente alcuni prototipi e sistemi realizzati dagli autori.

### 1.4.1 Simulazione chirurgica

L’evoluzione delle modalità d’addestramento del personale clinico e le emergenti necessità di aggiornamento e certificazione degli specialisti stanno negli ultimi anni portando ad una forte espansione della richiesta per sistemi di simulazione di procedure chirurgiche. Infatti, in analogia con quanto avviene nell’industria aeronautica, dove i simulatori sono da decenni strumenti fondamentali nei processi di addestramento e certificazione dei piloti, l’utilizzo di questa tecnologia permette:

- una notevole flessibilità nel calendario di addestramento;
- di graduare le difficoltà degli scenari di addestramento;
- di esporre l’addestrando ad eventi che nella pratica chirurgica sono rari, ma potenzialmente molto pericolosi per la vita del paziente;
- di misurare quantitativamente le *performance* e le skill chirurgiche dell’addestrando.

Purtroppo, a differenza di quanto succede nel campo aeronautico, i simulatori chirurgici basati su tecnologie di realtà virtuale stentano a raggiungere un elevato livello di realismo. Infatti, mentre in quest’ultimo caso il modello di interazione pilota-aereo è sostanzialmente semplice e la limitazione principale al “realismo” dei simulatori di volo è la velocità del rendering grafico, nel caso dei simulatori chirurgici il “realismo” è principalmente limitato dalla complessità del modello sottostante che descrive l’interazione virtuale tra gli strumenti manipolati dal chirurgo, gli organi e come quest’ultimi reagiscono alle manipolazioni. Per quanto riguarda la realizzazione di un simulatore chirurgico, esistono sostanzialmente due problematiche di ricerca. La prima è legata, sostanzialmente, al trovare nuove soluzioni tecnologiche per migliorare il “realismo” (*fidelity*) dei simulatori; la seconda è invece orientata a cercare come si possano meglio sfruttare le potenzialità offerte da questo tipo di addestratori per valutare in maniera quantitativa il livello di apprendimento dei suoi utilizzatori per scopo di addestramento o certificazione. Le due problematiche sono fortemente complementari ed esiste un consenso della comunità scientifica che esse siano tra i pilastri tecnologici fondamentali per lo sviluppo di un’attività industriale in questo settore. Satava ha identificato nel 1993, [72], cinque elementi, illustrati nella tabella 1.1, che influenzano il realismo di un ambiente virtuale per applicazioni mediche. La tabella fornisce per ogni elemento un obiettivo ideale da raggiungere, ma non fornisce dettagli su come si debbano stabilire i livelli di *fidelity*, intesa come realismo visivo, necessaria per la simulazione di una data procedura chirurgica.

La realizzazione pratica di un simulatore chirurgico impone di dover bilanciare tra i cinque elementi citati in tabella 1.1 in funzione della particolare applicazione, delle risorse computazionali e delle periferiche disponibili. Un esempio di simulatore chirurgico per l’addestramento realizzato considerando tutti gli elementi della tabella 1.1 secondo un approccio *human centered* nella progettazione dei componenti, è quello realizzato nel quadro del progetto IERAPSI dal CRS4 [8, 7], che

Elemento	Descrizione	Finalità
Fidelity	riproduzione visiva della scena	foto realismo, visione stereo con risoluzione almeno 800x600 pixels
Display delle proprietà degli organi	deformazione, resezione ed in generale modifica dell'aspetto degli organi	comportamento realistico dal punto di vista fisico e fisiologico
Display delle reazioni da parte degli organi	secrezione di fluidi, ad esempio sangue e fluido cerebro spinale	comportamento realistico dal punto di vista fisico e fisiologico
Interattività	interazioni tra oggetti come gli strumenti chirurgici e gli organi	latenza inferiore a 100msec, frequenza di update della scena visiva superiore a 20-25hz
Sensory feedback	ritorno di forze	modelli fisicamente realistici, latenze inferiori a 10msec, e frequenze di sampling superiori a 500-1000 hz.

Tabella 1.1: Gli elementi che definiscono la fidelity di un simulatore

rappresenta una piattaforma sperimentale specializzata alla simulazione di procedure chirurgiche sulla base cranica. Il sistema si basa su modelli volumetrici direttamente derivati da dati 3D di TAC e MR. Il ritorno di sensazioni in tempo reale viene fornito all'utente per mezzo di tecniche di rendering volumetrico e di modellazione di sensazioni aptiche.

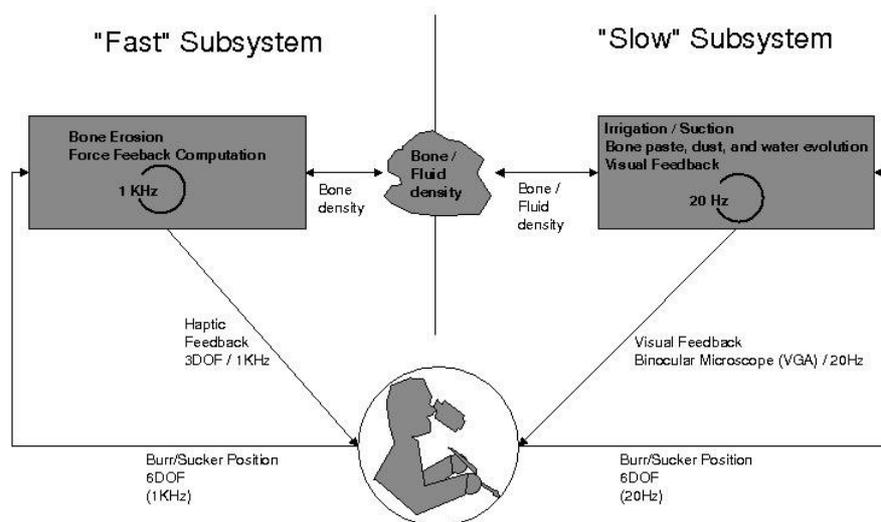


Figura 1.3: **Decomposizione logica del sistema.** Il sistema si suddivide in un sottosistema "rapido", per la gestione delle operazioni ad alta frequenza (rilevazione delle posizioni degli strumenti chirurgici, calcolo del ritorno di forza, erosione dell'osso), ed un sottosistema "lento", essenzialmente dedicato alla produzione di informazioni per il ritorno di immagini.

I vincoli nelle prestazioni imposti dal sistema percettivo umano sono soddisfatti sfruttando il parallelismo attraverso il disaccoppiamento della simulazione su una piattaforma di PC multi-processore. A tal proposito, il sistema si suddivide in un sottosistema “rapido”, per la gestione delle operazioni ad alta frequenza (rilevazione delle posizioni degli strumenti chirurgici, calcolo del ritorno di forza, erosione dell’osso), ed un sottosistema “lento”, essenzialmente dedicato alla produzione di informazioni per il ritorno di immagini.



Figura 1.5: Un sistema prototipale per la simulazione di procedure chirurgiche sull’osso temporale. Sinistra: set-up operativo reale, il chirurgo in contatto con il campo operativo solo attraverso gli strumenti. Destra: interfacce aptiche e visive del simulatore [7].

La fig. 1.5 illustra il set-up del sistema IERAPSI confrontato con un campo operatorio reale. Come si può notare, durante l’intervento il chirurgo osserva la regione interessata dall’operazione attraverso un microscopio chirurgico ed in contatto con il campo operativo solo attraverso gli strumenti, in questo caso una fresa ed un aspiratore. La dinamica del sistema con cui interagisce il chirurgo è complessa e riguarda non solo l’interazione diretta del chirurgo con i tessuti ma anche altri effetti secondari, ad esempio il flusso della miscela di sangue, soluzione salina e polvere d’osso risultante dalla fresatura. La parte destra della figura 1.5 mostra invece le interfacce aptiche e visive del simulatore per la chirurgia dell’orecchio [7]. In analogia al set-up operativo della parte sinistra della figura 1.5, il medico osserva il campo operativo simulato, attraverso un display specializzato, molto rudimentale, ed interagisce con la scena mediante due interfacce aptiche PHANTOM che, pilotate dal simulatore, riproducono le forze appropriate alla simulazione del contatto, in questo caso relative alla fresatura dell’osso. Infine, la figura 1.6 mostra l’inizio di una tipica sequenza di rimozione dell’osso realizzata nella regione della mastoide attraverso il simulatore IERAPSI.

Un altro esempio di piattaforma di realtà virtuale per l’addestramento chirurgico è il sistema EYE, sviluppato dal CRS4 per DIES, in cui vengono simulate le fasi dell’intervento di estrazione della cataratta [9]. In questo caso il tatto non è considerato senso dominante per cui le interfacce hardware vengono utilizzate solo come misuratori di posizione e orientamento. In questo tipo di simulazione, la modellazione fisica è fondamentale per l’addestramento delle abilità manuali e per la familiarizzazione con gli strumenti chirurgici. Il sistema EYE contiene simulazioni fisiche accurate e rappresentazioni geometriche realistiche delle seguenti fasi dell’intervento:

- **incisione della cornea:** creazione di uno o più tunnel all’interno della cornea in modo da poter accedere al cristallino;
- **capsuloressi:** creazione mediante un forcipe di un’apertura circolare sulla membrana anteriore che incapsula il cristallino;
- **facomulsificazione:** rottura e rimozione completa del cristallino mediante uno strumento ad ultrasuoni che funge anche da aspiratore.

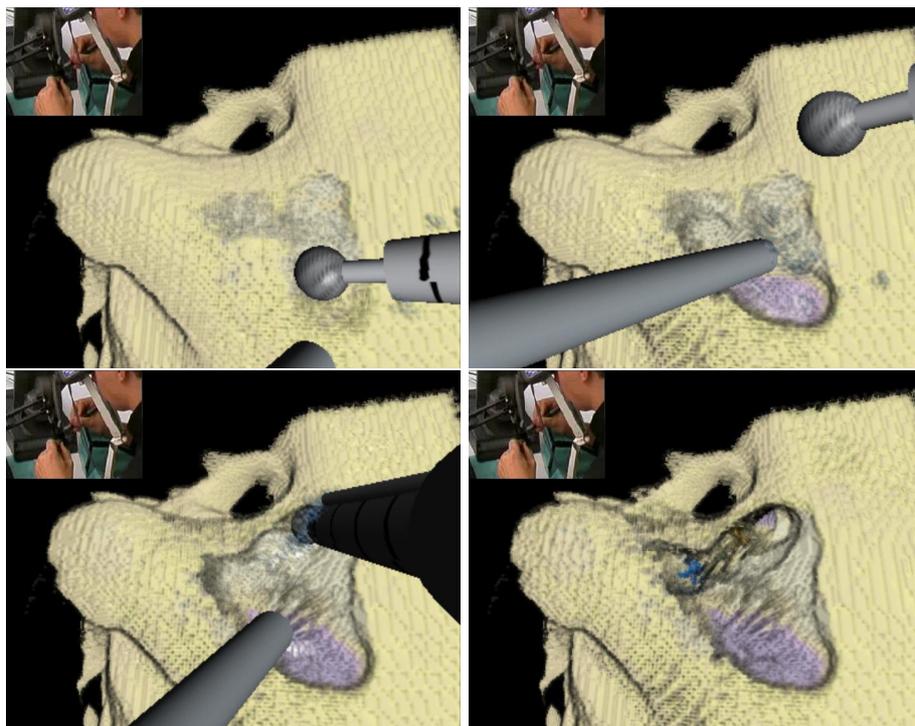


Figura 1.6: Sequenza di fresatura ottenuta con il simulatore chirurgico IERAPSI.

Nella configurazione attuale, il simulatore utilizza due Sensable PHANTOM per simulare gli strumenti chirurgici, ed un display binoculare per presentare immagini all'utente.

La figura 1.7 mostra delle sequenze virtuali ottenute col simulatore EYE e rappresentanti le fasi di capsuloressi e facoemulsificazione.

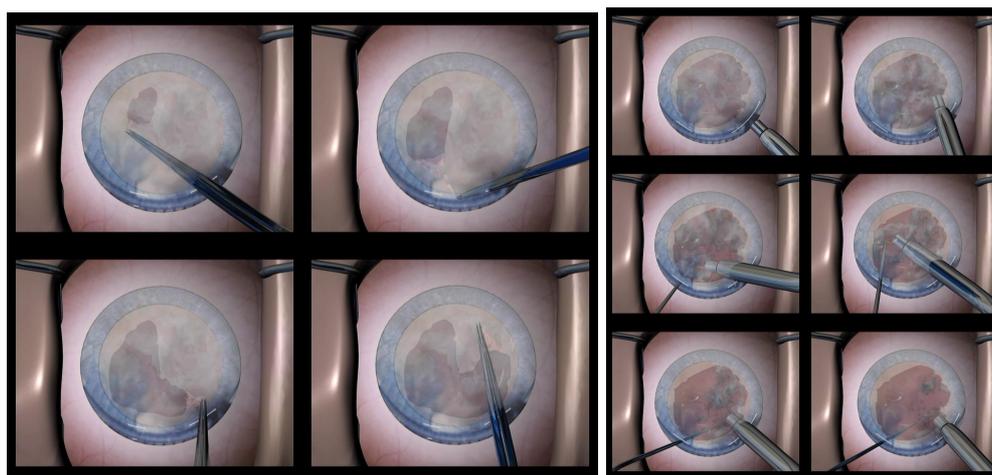


Figura 1.7: Sequenze virtuali di capsuloressi e facoemulsificazione virtuale ottenute con il simulatore chirurgico EYE.

### 1.4.2 Musei virtuali



Figura 1.8: Galicia Dixital.

Il recente sviluppo dei sistemi wireless per motion tracking, insieme alla crescita della potenza grafica dei laptop, ed alla popolarità delle reti wireless ha consentito la comparsa di sistemi in cui l'utente è in grado di muoversi fisicamente in un determinato spazio con determinati confini e contenente oggetti ed elementi di uno spazio virtuale. Alcuni esempi di questo spazio ibrido sono stati sviluppati in tutto il mondo [33, 82, 79]. Tuttavia, oltre ai problemi tecnici legati allo sviluppo di questi sistemi, si devono valutare attentamente i contenuti da mostrare, approfittando di tutte le possibilità astratte e tecnologiche offerte dal fatto che l'utente rappresenta di per sé il puntatore in questo tipo di applicazioni di realtà virtuale, laddove lo spazio di interazione rappresenta invece l'interfaccia. A tal proposito, in questo contesto, descriviamo a titolo di esempio l'Empty Museum [44], che è una piattaforma di realtà virtuale ideata e sviluppata dal gruppo di ingegneria, architettura, e visualizzazione di progetti urbani Videalab [3]. Questo sistema può essere descritto come una stanza virtuale, non contenente oggetti reali, ma ricca di contenuti interattivi galleggianti all'interno dello spazio virtuale che circonda l'utente. Questi contenuti possono essere osservati soltanto dai visitatori che indossano uno speciale zainetto a spalla ed un caschetto HMD (head mounted display). Così equipaggiato, il visitatore del museo può camminare liberamente all'interno di questo spazio, godendosi un'esperienza immersiva totale. La piattaforma è stata ideata per essere utilizzata da musei, reality center, ed è stata mostrata in pubblico in occasione di diverse mostre per promuovere diversi contenuti culturali [45, 46].

Il sistema possiede le seguenti principali caratteristiche:

- **Autonomo e wireless.** Si tratta di un'applicazione di realtà virtuale che consente all'utente di muoversi liberamente, senza limitazione alcuna dovuta a cavi dato che tutti i dispositivi indossati sono alimentati da batterie.
- **Transitabile.** La sensazione di presenza è rafforzata permettendo all'utente di camminare liberamente all'interno dello spazio virtuale.
- **Multi-utente.** Il sistema consente l'utilizzo simultaneo a diversi utenti, che sono consapevoli della presenza degli altri grazie all'utilizzo di avatar all'interno del mondo virtuale.
- **Multi-piattaforma.** L'intero sistema funziona sopra diverse piattaforme e fa in modo che ogni componente del sistema possa funzionare all'interno di diversi sistemi operativi.
- **Diffusione sonora tridimensionale.** Per aumentare la sensazione di immersione viene utilizzata una libreria audio specializzata 3D, che riproduce il suono tenendo in considerazione la posizione della sorgente sonora.

- **Funzionamento basato su tecnologie di rete.** Il sistema funziona utilizzando una rete TCP/IP. Questo permette diversi tipi di connessioni simultanee da differenti ubicazioni.

#### Architettura dell'Empty Museum

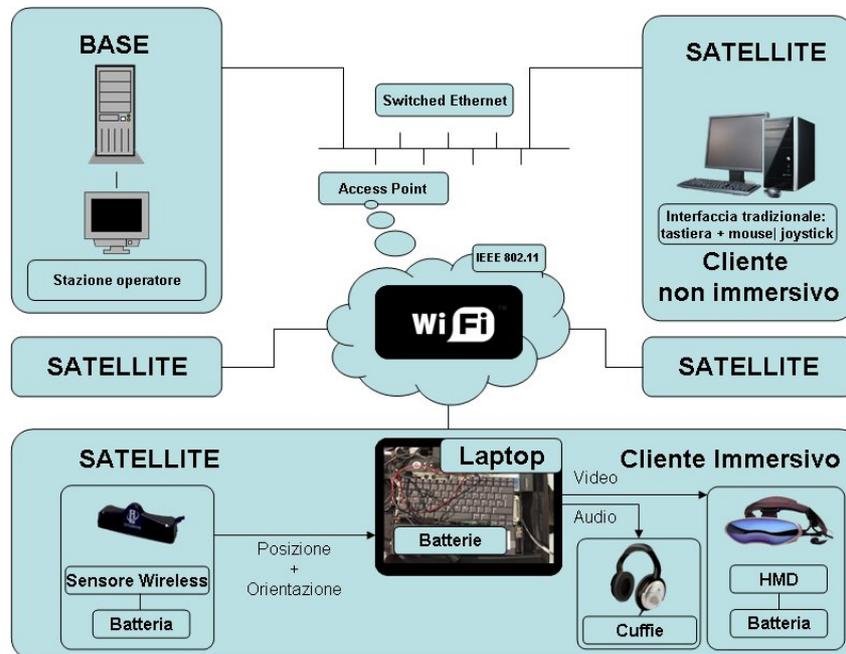


Figura 1.9: Diagramma che descrive l'architettura dell'Empty Museum.

L'architettura del sistema distingue tra due elementi principali, la base ed i satelliti (rappresentata in figura 1.9). La base ha il compito di gestire tutto ciò che riguarda i sistemi di tracking e le comunicazioni fra utenti e i mondi virtuali da caricare nei satelliti. La base si compone di un computer collegato ad un sistema di tracking magnetico InterSense IS-900, che cattura la posizione e l'orientazione. L'equipaggiamento dei satelliti consiste invece di un sistema HMD leggero (ad esempio modello Sony Glasstron), un laptop con accelerazione grafica hardware che permette di visualizzare i modelli in tempo reale, ed una antenna che fa parte del sistema di tracking a che permette di seguire la posizione dell'utente. Il sistema software è costituito da due applicazioni, corrispondenti al sistema fisso ed ai sistemi mobili. L'applicazione eseguita dalla base controlla il sistema di tracking e invia i dati di posizione sulla rete wireless, mentre quella eseguita dai satelliti si incarica del rendering specifico per quell'utente. L'applicazione satellite riceve in modo continuo i dati di tracking dalla base, e genera istantaneamente contenuti visivi e sonori per quella posizione. Inoltre elabora l'interazione con il mondo, con altri utenti e con possibili elementi del mondo virtuale. Per facilitare la creazione di mondi virtuali e di contenuti per l'Empty Museum, si è progettato un motore di interazione flessibile ed estendibile basato su moduli. Detto motore valuta una sequenza di regole logiche che scatenano l'esecuzione di differenti azioni. Le espressioni a loro volta possono essere costruite utilizzando costanti logiche, variabili o le uscite provenienti da diversi sensori dell'applicazione. I sensori possono essere di diversi tipi: di prossimità (con uscita logica del tipo dentro o fuori), di tempo (con uscita data da un segnale di trigger), di visibilità (con uscita logica del tipo raggiungibile o non raggiungibile), etc. Tutti i sensori possiedono ingressi e uscite che vengono utilizzate per rilevare eventi interessanti per l'interazione. Come risultato della composizione di questi elementi, si può implementare tutta la logica dell'applicazione in una o più macchine a stati.

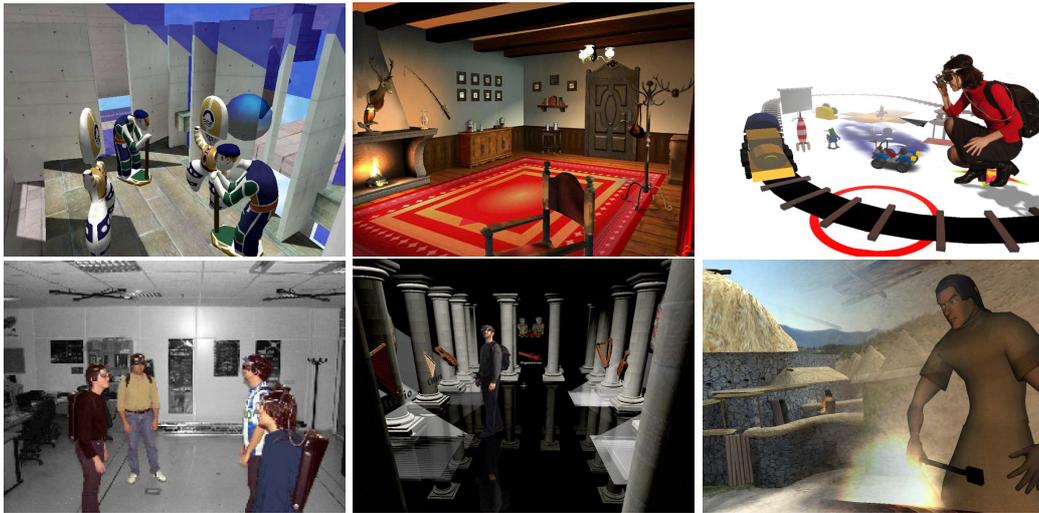


Figura 1.10: Esempi di mondi virtuali realizzati per l'Empty Museum.

### 1.4.3 Sistemi di visualizzazione stereo immersivi

Il crescente e rapido sviluppo dell'hardware grafico programmabile e l'utilizzo di nuove tecniche multirisoluzione fa in modo che sia possibile visualizzare in modo interattivo dataset di notevoli dimensioni ad elevata fedeltà visiva su normali PC. Riuscire a distinguere ed interpretare la disposizione spaziale di strutture tridimensionali complesse nelle immagini prodotte da questi tipi di tecniche rimane tuttavia un'operazione complicata. Qui descriviamo brevemente un esempio di sistema di visualizzazione su dei display light field multi-utente basati su tecnologia di proiezione, sviluppato dal CRS4 nel quadro dei progetti COHERENT e CYBERSAR. L'obiettivo principale di questo sistema è quello di aumentare il livello di comprensibilità dei dati 3D attraverso delle informazioni percettive aggiuntive per quanto riguarda l'accomodazione, la stereopsi e la parallasse di movimento, fornite da un display light field che supporti il filtraggio selettivo delle direzioni di luce. Esistono evidenze che l'ego-motion o model-motion così come la stereopsi sono informazioni essenziali per ottenere una percezione rapida diretta dei dati volumetrici [17, 64]. I light field

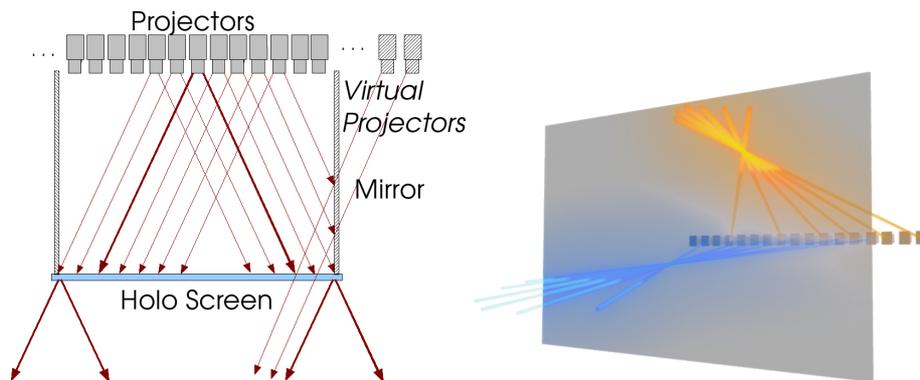


Figura 1.11: **Idea del light field display.** Sinistra: ciascun proiettore emette dei fasci di luce verso un sottoinsieme dei punti dello schermo olografico. Gli specchi laterali incrementano il numero disponibile di fasci luminosi. Destra: un numero elevato di fasci di luce è in grado di creare un punto spaziale (voxel).

display utilizzati sono basati su una sequenza di proiettori allineati e posti dietro uno schermo



Figura 1.12: **Prototipo di light field display di grosse dimensioni.** Dalle fotografie si possono apprezzare i dettagli dell'array dei proiettori e della fotocamera utilizzata per la calibrazione situati nella parte posteriore del setup.

olografico (vedi figura 1.11). Ulteriori informazioni sulla tecnologia in questione possono essere trovate in [16]. La figura 1.12 mostra i dettagli di un display di grosse dimensioni: si possono apprezzare l'array di proiettori e la fotocamera utilizzata per la calibrazione situati nella parte posteriore del setup.

Questo setup fornisce una parallasse orizzontale continua in una buona zona davanti allo schermo. La semplificazione data dalla parallasse orizzontale riduce la complessità del light field, rendendo il problema di real-time rendering più trattabile. Le caratteristiche del display sono sfruttate da una tecnica di rendering specializzata che è in grado di dare a molti osservatori in movimento ad occhio nudo l'illusione di vedere oggetti volumetrici virtuali come se galleggiasse nello spazio in determinate posizioni fisiche all'interno dello spazio di lavoro del display (vedi figura 1.13).



Figura 1.13: **Interazione in tempo reale con il light field display** Ispezione in tempo reale di un modello di grosse dimensioni volumetrico contenente un dataset CT di un campione biologico. Le immagini sono state acquisite con una camera da diverse angolazioni, in modo da mettere in evidenza la parallasse orizzontale del display light field.

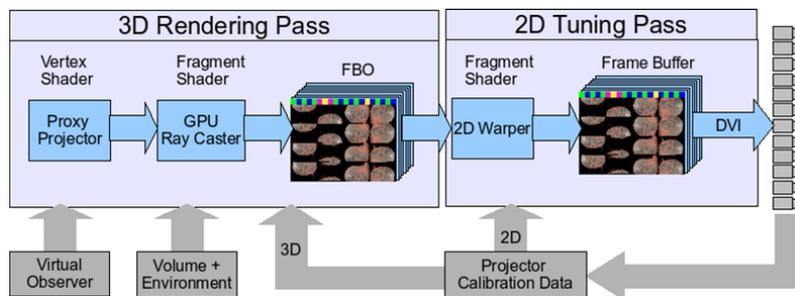


Figura 1.14: Pipeline grafica per la generazione di immagini attraverso volume ray casting su un light field display

In figura 1.13 vengono mostrati i risultati di un GPU ray-caster volumetrico su un display di questo tipo: Il GPU ray caster in questo caso segue i raggi generati da una tecnica multiple-center-of-projection (MCOP), secondo la pipeline rappresentata in figura 1.14. In figura 1.15 viene invece mostrata la pipeline grafica ideata ed implementata per gestire i modelli di superficie complessi, che avviene attraverso il campionamento di versioni pre-filtrate dei dataset a risoluzioni che corrispondono all'accuratezza spaziale variabile del display. I display usati in queste applicazioni sono prodotti da Holografika [16], ed offrono un blend continuo tra le viste grazie alle proprietà di filtraggio della luce dello schermo olografico. Prestazioni real-time sono ottenute attraverso il controllo delle dimensioni delle immagini e delle frequenze di campionamento.

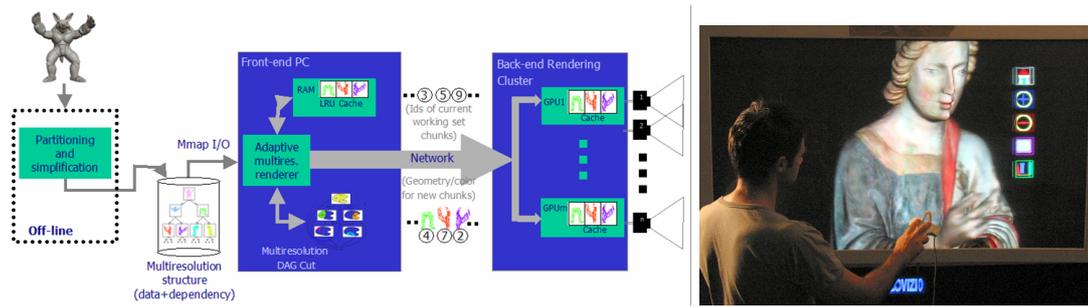


Figura 1.15: Pipeline grafica per la gestione di modelli di superficie complessi.

## 1.5 Conclusioni

Per concludere, possiamo dire che, data la complessità della realtà virtuale, l'importanza dei fattori umani, e la carenza di soluzioni standard, il segreto per realizzare applicazioni di realtà virtuale realmente efficaci consiste nel fissare degli obiettivi realistici in considerazione della maturità della tecnologia [58, 40]. È molto semplice cadere in confusione su cosa la realtà virtuale può o non può fare ed avere delle impressioni negative quando ci si rende conto che la realtà virtuale non è poi così reale. Come per tutte le tecnologie, ma in modo ancora più pressante per una tecnologia complessa come la realtà virtuale, è importante scegliere applicazioni appropriate che definiscano correttamente ed in modo preciso degli obiettivi determinati, in modo tale che le potenzialità della realtà virtuale possano essere messe a confronto con altre tecnologie utilizzate per raggiungere gli stessi obiettivi, ed al fine di assicurare che la realtà virtuale possa essere integrata all'interno di pratiche di utilizzo consolidate [58]. Ma d'altra parte, se si volesse fare anche un discorso legato al tipo di mercato che può avere la realtà virtuale, allora le cose si complicano. Infatti, se si considera la spinta che vi era nei primi anni 90 per una forte diffusione sul mercato consumer, non si può non considerare che da allora lo sviluppo del settore ha segnato il passo, soprattutto se confrontato allo sviluppo di altre tecnologie (vedi web). I motivi che hanno portato al rallentamento della diffusione possono essere di vario tipo: sicuramente la scomodità e il costo delle attrezzature, ma soprattutto l'assenza della cosiddetta killer application, ovvero quel software o quel servizio che spinge tanti ad acquistare le attrezzature, e che porta alla creazione di un nuovo mercato dal quale le industrie si alimentano e nel quale investono proponendo nuove soluzioni e prodotti. E' evidente, in effetti, che il successo della Realtà Virtuale, non potrà essere raggiunto, fintanto che le interfacce più realistiche per la visione e l'interazione tattile saranno assai costose, e finché quelle economicamente più accessibili non daranno una soddisfacente sensazione di realismo. Ciò nonostante, esiste chi prevede delle prospettive future con scenari realmente modificati, in cui l'avvento dell'ipertecnologia provveder in un futuro prossimo a modificare intere professioni. La Realtà Virtuale interattiva, si prevede che permetterà di vivere situazioni da sogno, oltre che seguire una formazione personalizzata che preparerà i famosi lavoratori della conoscenza, risolvendo problematiche tutt'oggi fantascientifiche. Molti problemi, soprattutto per quanto riguarda il ritorno di sensazioni, sono ancora irrisolti, ma si ipotizza ancora che scenari come quelli descritti nei film Matrix e Minority Report siano possibili in un futuro non troppo remoto.



# Bibliografia

- [1] Creative commons, 2008. <http://creativecommons.org>.
- [2] Dimension, 2008. <http://www.dimensionprinting.com>.
- [3] Engineering, architecture and urban design visualisation group: Videalab, 2008. <http://videalab.udc.es>.
- [4] iphone, 2008. [http://en.wikipedia.org/wiki/Apple\\_iPhone](http://en.wikipedia.org/wiki/Apple_iPhone).
- [5] Ogle models and prototypes, 2008. <http://www.oglemodels.com/>.
- [6] Zcorp, 2008. <http://www.zcorp.com>.
- [7] AGUS, M., GIACHETTI, A., GOBBETTI, E., ZANETTI, G., JOHN, N. W., AND STONE, R. J. Mastoidectomy simulation with combined visual and haptic feedback. In *Medicine Meets Virtual Reality 2002* (January 2002), J. D. Westwood, H. M. Hoffmann, G. T. Mogel, and D. Stredney, Eds.
- [8] AGUS, M., GIACHETTI, A., GOBBETTI, E., ZANETTI, G., AND ZORCOLO, A. Real-time haptic and visual simulation of bone dissection. In *IEEE Virtual Reality Conference, Conference* (Orlando, FL, USA, March 2002), IEEE Computer Society Press.
- [9] AGUS, M., GOBBETTI, E., PINTORE, G., ZANETTI, G., AND ZORCOLO, A. Real time simulation of phaco-emulsification for cataract surgery training. In *Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulations (VRIPHYS 2006)* (November 2006), Eurographics Association. Conference held in Madrid, Spain, November 6-7.
- [10] AHLERS, K., AND KRAMER, A. Distributed augmented reality for collaborative design applications. Tech. rep., European Computer Industry Research Center, 1995.
- [11] AIREY, J. M., ROHLF, J. H., AND BROOKS, JR., F. P. Towards image realism with interactive update rates in complex virtual building environments. *Computer Graphics (1990 Symposium on Interactive 3D Graphics) 24*, 2 (Mar. 1990), 41–50.
- [12] BALAGUER, J.-F., AND DE GENNARO, S. VENUS: A virtual reality project at CERN. *Computer Graphics 30*, 4 (Nov. 1996), 40–48.
- [13] BALAGUER, J.-F., AND GOBBETTI, E. i3D: a high-speed 3D Web browser. In *1995 Symposium on the Virtual Reality Modeling Language (VRML '95)* (Conference held in San Diego, CA, USA, Dec. 1995), ACM Press, pp. 69–76.
- [14] BALAGUER, J.-F., AND GOBBETTI, E. i3D: A high speed 3D web browser. In *VRML: Bringing Virtual Reality to the Interet*, J. R. Vacca, Ed. AP Professional, Boston, MA, USA, 1996.
- [15] BALAGUER, J.-F., AND MANGILI, A. Virtual environments. In *New Trends in Animation and Visualization.*, D. Thalmann and N. Magnenat-Thalmann, Eds. Wiley, New York, NY, USA, 1992.

- [16] BALOGH, T., FORGCS, T., AGOCS, T., BALET, O., BOUVIER, E., BETTIO, F., GOBBETTI, E., AND ZANETTI, G. A scalable hardware and software system for the holographic display of interactive graphics applications. In *Eurographics Short Papers Proceedings* (2005), pp. 109–112.
- [17] BOUCHENY, C., BONNEAU, G.-P., DROULEZ, J., THIBAUT, G., AND PLOIX, S. A perceptive evaluation of volume rendering techniques. In *Proc. ACM APGV* (2007), pp. 83–90.
- [18] BROOKS, JR., F. P. Walkthrough — A dynamic graphics system for simulating virtual buildings. In *Proceedings of 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics* (Oct. 1986), F. Crow and S. M. Pizer, Eds., pp. 9–21.
- [19] BRYSON, S. T., AND JOHAN, S. Time management, simultaneity and time-critical computation in interactive unsteady visualization environments. In *IEEE Visualization '96* (Oct. 1996), IEEE. ISBN 0-89791-864-9.
- [20] BURDEA, G. C. *Force and touch feedback for virtual reality*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1996.
- [21] BURDEA, G. C. Haptic feedback for virtual reality. *special issue on Virtual Prototyping, International Journal of Design and Innovation Research 2* (2000), 17–29.
- [22] COBB, S., NICHOLS, S., RAMSEY, A., AND WILSON, J. Health and safety implications of virtual reality: Results and conclusions from an experimental programme. In *Proceedings of FIVE '96: Framework for Immersive Working Environments, the 2nd FIVE International Conference* (1996), pp. 154–162.
- [23] CONNER, D. B., SNIBBE, S. S., HERNDON, K. P., ROBBINS, D. C., ZELEZNIK, R. C., AND VAN DAM, A. Three-dimensional widgets. *Computer Graphics 25*, 2 (Mar. 1992), 183–188.
- [24] COSSAIRT, O., NAPOLI, J., HILL, S., DORVAL, R., AND FAVALORA, G. Occlusion-capable multiview volumetric three-dimensional display. *Applied Optics 46*, 8 (Mar. 2007), 1244–1250.
- [25] CRAWFORD, L. S. A DEXTROUS MASTER FOR TELESURGERY. Technical Report ERL-93-95, University of California, Berkeley, Dec. 1993.
- [26] DAVSON, H. *Physiology of the Eye*, fifth ed. Pergamon Press, New York, NY, USA, 1994.
- [27] DODGSON, N. A. Analysis of the viewing zone of the Cambridge autostereoscopic display. *Applied Optics: Optical Technology & Biomedical Optics 35*, 10 (1996), 1705–1710.
- [28] DODGSON, N. A., MOORE, J. R., LANG, S. R., MARTIN, G., AND CANEPA, P. Time-sequential multi-projector autostereoscopic 3D display. *J. Soc. for Information Display 8*, 2 (2000), 169–176.
- [29] DRASCISC, D. Stereoscopic vision and augmented reality. *Scientific Computing and Automation 9*, 7 (June 1996), 31–34.
- [30] ELLIS, G. They're not making 'em like they used to: Virtual reality saves time and money in manufacturing and construction. *Iris Universe* (1996).
- [31] FAVALORA, G., DORVAL, R., HALL, D., AND NAPOLI, J. Volumetric three-dimensional display system with rasterization hardware. In *Proc. SPIE* (2001), vol. 4297, pp. 227–235.
- [32] FEINER, S., MACINTYRE, B., HAUPT, M., AND SOLOMON, E. Windows on the world: 2D windows for 3D augmented reality. In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (1993), Virtual Reality, pp. 145–155.

- [33] FEINER, S., MACINTYRE, B., HOLLERER, T., AND WEBSTER, A. A touring machine: Prototyping 3d mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *iswc 00* (1997), 74.
- [34] FISHER, S. S., MCGREEVY, M., HUMPHRIES, J., AND ROBINETT, W. Virtual environment display system. In *Proc. 1986 ACM Workshop on Interactive 3D Graphics* (Chapel Hill, NC, Oct. 1986), pp. 77–87.
- [35] GOBBETTI, E., AND BALAGUER, J. An integrated environment to visually construct 3D animations. In *SIGGRAPH 95 Multimedia Conference Proceedings* (Conference held in Los Angeles, CA, USA, Aug. 1995), R. Cook, Ed., Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Addison-Wesley.
- [36] GOBBETTI, E., AND BALAGUER, J.-F. VB2: An architecture for interaction in synthetic worlds. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on User Interface Software and Technology* (Conference held in Atlanta, GA, USA, 1993), Virtual Reality, ACM Press, pp. 167–178.
- [37] GOBBETTI, E., AND BALAGUER, J.-F. i3D: An interactive system for exploring annotated 3D environments. In *Scientific Visualization '95 (AICA '95 International Symposium on Scientific Visualization Proceedings)* (Conference held in Chia, Italy, 1995), R. Scateni, Ed., World Scientific Publishing Co.
- [38] GOBBETTI, E., LEONE, A., AND MARINI, A. Virtual sardinia: a hypermedia fly-through with real data. In *Proceedings of the International Workshop on Soft Computing in Remote Sensing Data Analysis* (Conference held in Milan, Italy, 1995), E. Binaghi, P. B. PA, and A. Rampini, Eds., pp. 253–260.
- [39] GOBBETTI, E., AND MARTON, F. Far Voxels – a multiresolution framework for interactive rendering of huge complex 3d models on commodity graphics platforms. *ACM Transactions on Graphics* 24, 3 (August 2005), 878–885. Proc. SIGGRAPH 2005.
- [40] GOBBETTI, E., AND SCATENI, R. Virtual reality: Past, present, and future. In *Virtual Environments in Clinical Psychology and Neuroscience: Methods and Techniques in Advanced Patient-Therapist Interaction*, G. Riva, B. K. Wiederhold, and E. Molinari, Eds. IOS, Amsterdam, The Netherlands, November 1998, pp. 3–20.
- [41] GOLD, R., BUXTON, B., FEINER, S., AND SCHMANDT, C. Ubiquitous computing and augmented reality. *Computer Graphics* 27, Annual Conference Series (1993), 393–394.
- [42] GREENFIELD, D. Virtual prototyping at rolls-royce. *Intelligent Systems, Report 13*, 1 (1996).
- [43] HAINES, E., AND AKENINE-MOLLER, T. *Real-Time Rendering (2nd Edition)*. AK Peters, Ltd., July 2002.
- [44] HERNÁNDEZ, L., TAIBO, J., SEOANE, A., LÓPEZ, R., AND LÓPEZ, R. The empty museum. multi-user interaction in an immersive and physically walkable vr space. In *CW '03: Proceedings of the 2003 International Conference on Cyberworlds* (Washington, DC, USA, 2003), IEEE Computer Society, p. 446.
- [45] HERNANDEZ, L., TAIBO, J., SEOANE, A., LOPEZ, R., AND LOPEZ, R. The experience of the empty museum. displaying cultural contents on an immersive, walkable vr room. In *CGI '04: Proceedings of the Computer Graphics International* (Washington, DC, USA, 2004), IEEE Computer Society, pp. 436–443.
- [46] HERNANDEZ, L. A., TAIBO, J., BLANCO, D., IGLESIAS, J. A., SEOANE, A., JASPE, A., AND LOPEZ, R. Physically walking in digital spaces - a virtual reality installation for exploration of historical heritage. *International Journal of Architectural Computing* 5, 3 (September 2007), 487–506.

- [47] HERNDON, K., VAN DAM, A., AND GLEICHER, M. The challenges of 3D interaction: A CHI'94 workshop. *SIGCHI Bulletin* 26, 4 (Oct. 1994), 36–43.
- [48] HERNDON, K. P., ZELEZNIK, R. C., ROBBINS, D. C., CONNER, D. B., SNIBBE, S. S., AND VAN DAM, A. Interactive shadows. In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (1992), 3D User Interfaces, pp. 1–6.
- [49] HOLLERBACH, J., AND JACOBSEN, S. Haptic interfaces for teleoperation and virtual environments. In *Workshop on Simulation and Interaction in Virtual Environments* (1995).
- [50] HUEBSCHMAN, M., MUNJULURI, B., AND GARNER, H. Dynamic holographic 3-d image projection. *Optics Express* 11 (2003), 437–445.
- [51] JAIN, A. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 07632, USA, 1989.
- [52] JASNOCH, U., KLEMENT, E., H.KRESS, AND SCHIFFER, N. Towards collaborative virtual prototyping in a world market. In *Proceedings FAIM* (Atlanta, 1996).
- [53] JONES, A., MCDOWALL, I., YAMADA, H., BOLAS, M. T., AND DEBEVEC, P. E. Rendering for an interactive 360 degree light field display. *ACM Trans. Graph* 26, 3 (2007), 40.
- [54] KENNEDY, R. Simulator sickness: relationship of different symptoms to equipment configuration and safety. In *Proceedings of DSC'95: Driving Simulation Conference* (1995), pp. 42–58.
- [55] KIM, S.-K., SON, J.-Y., AND HONDA, T. HMD-type multifocus 3D display system. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI. Edited by Woods, Andrew J.; Merritt, John O.; Benton, Stephen A.; Bolas, Mark T. Proceedings of the SPIE, Volume 5291, pp. 347-353 (2004)*. (May 2004), A. J. Woods, J. O. Merritt, S. A. Benton, and M. T. Bolas, Eds., vol. 5291 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pp. 347–353.
- [56] KOSSLYN, S. *Image and Brain: The resolution of the imagery debate*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1994.
- [57] LANDIS, C. Determinants of the critical flicker-fusion threshold. *Physiological Review* 34 (1954), 259–286.
- [58] LESTON, J., RING, K., AND KYRAL, E. *Virtual Reality: Business Applications, Markets and Opportunities*. Ovum, 1996.
- [59] MACKENZIE, C. L., AND BOOTH, K. S. Manipulation in virtual environments. In *Proceedings of ACM CHI 96 Conference on Human Factors in Computing Systems* (1996), vol. 2 of *Workshops*, p. 420.
- [60] MATUSIK, W., AND PFISTER, H. 3D TV: a scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes. *ACM Transactions on Graphics* 23, 3 (Aug. 2004), 814–824.
- [61] MCKAY, S., MAIR, G., MASON, S., AND REVIE, K. Membrane-mirror based autostereoscopic display for teleoperation and telepresence applications. In *Proc. SPIE* (2000), vol. 3957, pp. 198–207.
- [62] MCKENNA, M., AND ZELTZER, D. Three dimensional visual display systems for virtual environments. *Presence* 1, 4 (1992), 421–458.
- [63] MCNEELY, W. Boeing's high performance visualization software: Flythru. CERN Computing Seminar, June 1996.

- [64] MORA, B., AND EBERT, D. S. Instant volumetric understanding with order-independent volume rendering. *Computer Graphics Forum* 23, 3 (2004), 489–497.
- [65] MORONEY, W. F., AND MORONEY, B. W. Utilizing a microcomputer based flight simulation in teaching human factors in aviation. In *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting* (1991), vol. 1 of *Educators' Professional: Use of Microcomputers in Teaching Human Factors in Aviation*, pp. 523–527.
- [66] MUELLER, C. Architectures of image generators for flight simulators. Tech. Rep. TR95-015, Department of Computer Science, University of North Carolina - Chapel Hill, Apr. 24 1995. Wed, 26 Jun 1996 18:10:16 GMT.
- [67] PISANICH, G. M., AND HEERS, S. T. A laboratory glass-cockpit flight simulator for automation and communications research. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 39th Annual Meeting* (1995), vol. 2 of *POSTERS*, p. 951.
- [68] REGAN, E., AND PRICE, K. Some side-effects of immersion virtual reality. *VR News* (1993).
- [69] RELKE, I., AND RIEMANN, B. Three-dimensional multiview large projection system. In *Proc. SPIE* (2005), vol. 5664.
- [70] ROBERTS, J. W., AND SLATTERY, O. Display characteristics and the impact on usability for stereo. In *Proc. SPIE* (2000), vol. 3957, p. 128.
- [71] ROSEN, J. M., AND LAUB, D. Virtual reality and medicine: From training systems to performing machines. In *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium* (1996), pp. 5–13.
- [72] SATAVA, R. M. Virtual reality surgical simulator: The first steps. *Surgical Endoscopy* 7 (1993), 203–205.
- [73] ST.-HILLAIRE, P., LUCENTE, M., SUTTER, J., PAPPU, R., SPARRELL, C. G., AND BENTON, S. Scaling up the mit holographic video system. In *Proc. 5th SPIE Symposium on Display Holography* (1995), pp. 374–380.
- [74] STANLEY, M., CONWAY, P., COOMBER, S., JONES, J., SCATTERGOOD, D., SLINGER, C., BANNISTER, B., BROWN, C., CROSSLAND, W., AND TRAVIS, A. A novel electro-optic modulator system for the production of dynamic images from giga-pixel computer generated holograms. In *Proc. SPIE* (2000), vol. 3956, pp. 13–22.
- [75] STATE, A., LIVINGSTON, M. A., GARRETT, W. F., AND HIROTA, G. Technologies for augmented-reality systems: Realizing ultrasound-guided needle biopsies. *Computer Graphics* 30, Annual Conference Series (1996), 439–446.
- [76] STATE, A., LIVINGSTON, M. A., HIROTA, G., GARRETT, W. F., WHITTON, M. C., AND FUCHS, H. Technologies for augmented-reality systems: Realizing ultrasound-guided needle biopsies. In *SIGGRAPH 96 Conference Proceedings* (Aug. 1996), H. Rushmeier, Ed., Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, pp. 439–446. held in New Orleans, Louisiana, 04-09 August 1996.
- [77] SUTHERLAND, I. E. The ultimate display. In *Proceedings of IFIPS Congress* (New York City, NY, May 1965), vol. 2, pp. 506–508.
- [78] T.H., M., AND K., S. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interface for Virtual Environments and Teleoperator Systems* (Chicago, IL, 1994).
- [79] THOMAS, B., CLOSE, B., DONOGHUE, J., SQUIRES, J., BONDI, P. D., AND PIEKARSKI, W. First person indoor/outdoor augmented reality application: Arquake. *Personal Ubiquitous Comput.* 6, 1 (2002), 75–86.

- [80] URBAN, E. The information warrior. *IEEE Spectrum* 32, 11 (1996), 66–70.
- [81] VAN BERKEL, C., PARKER, D., AND FRANKLIN, A. Multiview 3d-lcd. In *Proc. SPIE* (1996), vol. 2653, p. 32.
- [82] VLAHAKIS, V., KARIGIANNIS, J., TSOTROS, M., GOUNARIS, M., ALMEIDA, L., STRICKER, D., GLEUE, T., CHRISTOU, I. T., CARLUCCI, R., AND IOANNIDIS, N. Archeoguide: first results of an augmented reality, mobile computing system in cultural heritage sites. In *VAST '01: Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage* (New York, NY, USA, 2001), ACM, pp. 131–140.
- [83] WLOKA, M. Interacting with virtual reality. In *Virtual Environments and Product Development Processes* (1995), Chapman and Hall.
- [84] WLOKA, M. Lag in multiprocessor virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 4, 1 (Sept. 1995), 50–63.
- [85] WOODGATE, G. J., HARROLD, J., JACOBS, A. M. S., MOSELEY, R. R., AND EZRA, D. Flat-panel autostereoscopic displays: characterisation and enhancement. In *Proc. SPIE* (2000), vol. 3957, p. 153.
- [86] YAGEL, R., STREDNEY, D., WIET, G. J., SCHMALBROCK, P., ROSENBERG, L., SESSANNA, D. J., KURZION, Y., AND KING, S. Multisensory platform for surgical simulation. In *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium 1996 (VRAIS'96)* (Mar. 1996), pp. 72–78.
- [87] YOUNGBLUT, C., JOHNSON, R. E., NASH, S. H., WIENCLAW, R. A., AND WILL, C. A. Review of virtual environment interface technology. IDA Paper P-3186, Institute for Defense Analyses, Mar. 1995.
- [88] ZAJTCHUK, R., AND SATAVA, R. M. Medical applications of virtual reality. *Communications of the ACM* 40, 9 (Sept. 1997), 63–64.