

TECNOLOGIE APTICHE

Introduzione

La parola aptico - in una visione non scientifica - si riferisce al senso del tatto e a tutto ciò che vi è collegato. Il tatto richiede sempre un'interazione; pertanto, la percezione del tatto non può avvenire senza contatto e, di conseguenza, senza che qualcosa venga toccato o da cui si viene toccati. A differenza della visione e del suono, l'aptica ha sempre un impatto sull'oggetto toccato a causa dell'interazione, e la classificazione delle interazioni varia a seconda delle proprietà fisiche del corpo e dell'oggetto. Si pensi anche al fatto che il senso del tatto è rilevante per ogni parte del corpo che interagisce con l'ambiente, e in particolare per ogni area protetta dalla pelle: ognuna di queste parti ha capacità sensoriali diverse.

Definizione: l'aptica descrive il senso del tatto e del movimento e le interazioni (meccaniche) da cui essi sono coinvolti.

TECNOLOGIE APTICHE

Introduzione

Un ingegnere tende a descrivere l'aptica principalmente in termini di forze, allungamenti, frequenze, tensioni meccaniche e forze di trazione. Questo ha ovviamente senso ed è importante per il processo di progettazione tecnica. Tuttavia, l'aptica inizia prima di tutto questo. La percezione aptica va dalle interazioni minori della vita quotidiana (esempi: bere da un bicchiere, scrivere un testo), ai mezzi di comunicazione sociale (esempi: stringere la mano, dare una pacca sulla spalla).

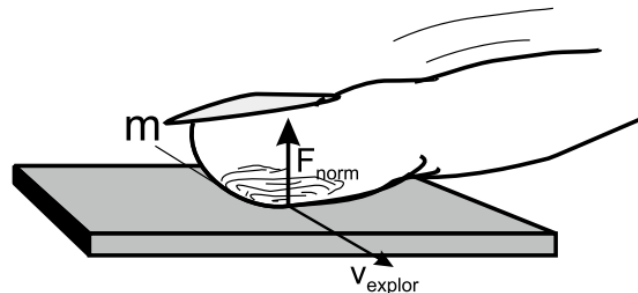
Il senso del tatto ha numerose funzioni. La conoscenza di queste funzioni consente all'ingegnere di formulare specifiche per i sistemi da progettare. È utile considerare l'intera gamma di scopi per i quali può essere utile il senso del tatto.

Il senso del tatto non è specializzato solo nella percezione dei confini fisici del corpo ma anche nell'analisi dell'ambiente circostante, compresi gli oggetti che caratterizzano l'ambiente e le loro proprietà. Gli esseri umani e i loro predecessori dovevano essere in grado di discriminare, ad esempio, la struttura di frutti e foglie, per identificare il loro grado di maturazione o se fossero commestibili o meno. Il senso aptico ci permette di identificare una struttura potenzialmente nociva, come ad esempio un frutto costituito da spine, e di fare attenzione quando lo tocchiamo al fine di recuperare il suo contenuto nonostante le spine.

TECNOLOGIE APTICHE

Introduzione

Il senso del tatto è stato sviluppato per la percezione e la discriminazione delle proprietà della superficie, come ad esempio la rugosità. Le proprietà della superficie possono variare da superfici lisce, come quelle ceramiche o laccate, con larghezze strutturali dell'ordine di alcuni μm , a superfici piuttosto strutturate come i tavoli rivestiti e a superfici ruvide come tessuti in corda grossolanamente intrecciati con aperture di maglia dell'ordine di alcuni millimetri. Gli esseri umani hanno sviluppato un modo molto tipico di interagire con queste superfici che consente loro di trarre conclusioni basate sul meccanismo di percezione. Un essere umano muove il dito lungo la superficie, consentendo l'accoppiamento di forze alla pelle (si veda la figura). Il livello delle forze dipende dalla qualità dell'accoppiamento per attrito tra la superficie dell'oggetto e la pelle. È una combinazione dell'elasticità tangenziale della pelle in funzione della forza normale derivante dal tocco F_{norm} , della velocità



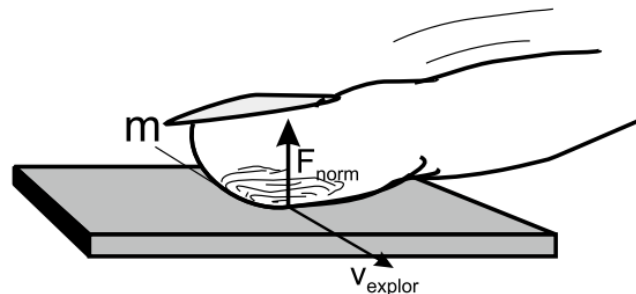
Interazione dei movimenti: forze normali sul dito e accoppiamento per attrito.

TECNOLOGIE APTICHE

Introduzione

v_{explor} del movimento e della qualità dell'accoppiamento. La natura, per essere in grado di accoppiare la forza alla pelle in modo più efficiente, ha «inventato» una struttura speciale nella parte del corpo più importante per il contatto e l'esplorazione: l'impronta digitale. Le creste epidermiche accoppiano in modo efficiente le forze alla pelle, in quanto le barre trasmettono un momento flettente agli strati superiori. Inoltre, queste barre consentono di formare chiusure all'interno di larghezze strutturali di dimensioni simili, le quali causano un incastro tra l'oggetto e la pelle della mano.

Un altro aspetto del senso aptico è la capacità di utilizzare gli strumenti. Alcuni meccanorecettori della pelle rilevano le vibrazioni che si verificano quando si maneggia uno strumento rigido. Il rilevamento di queste vibrazioni consente di identificare le diverse proprietà della superficie e di rilevare le situazioni di contatto e di collisione.



Interazione dei movimenti: forze normali sul dito e accoppiamento per attrito.

TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Interazione Aptica

Il sistema aptico consente agli esseri umani di interagire con ambienti reali o virtuali attraverso abilità meccaniche, sensoriali, motorie e cognitive. Un'interazione consiste in una o più operazioni, che possono essere generalmente classificate in *motor control* (controllo del movimento) e *perception* (percezione). Le operazioni associate a tali classi vengono chiamate *primitive*, poiché non possono essere divise e ulteriormente classificate.

La classe *perception* include le primitive *detection*, *discrimination*, *identification* e *scaling* associate all'informazione aptica. L'analisi di tali primitive viene condotta dalla psicofisica. Per approfondire le primitive della classe *perception* è necessaria la definizione seguente.

Definizione: uno *stimolo* (*stimulus*) è un'eccitazione o un segnale utilizzato in una procedura associata alla psicofisica.

TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Interazione Aptica

Stimoli tipici nelle tecnologie aptiche sono forze, vibrazioni o oggetti con specifiche proprietà. Utilizzando la definizione di stimolo (si veda la slide precedente), può essere descritta ognuna delle primitive della classe *perception*, poiché ogni singola primitiva può essere applicata solo ad alcuni stimoli aptici:

- *Detection*: tale primitiva descrive come la presenza di uno stimolo viene rilevata da un essere umano o da un utente. In base alle condizioni di interazione, gli stimoli possono essere rilevati o non rilevati. Ciò dipende non solo dagli organi sensoriali coinvolti ma anche dall'elaborazione neurale. Le altre primitive della classe *perception* possono essere applicate solo se viene rilevato almeno uno stimolo.
- *Discrimination*: se è presente e viene rilevato più di uno stimolo, tale primitiva descrive come vengono percepite le informazioni che sono incluse in differenti proprietà di un segnale (esempi: frequenza e ampiezza di una vibrazione) o di un oggetto (esempi: durezza, consistenza, massa).

TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Interazione Aptica

Stimoli tipici nelle tecnologie aptiche sono forze, vibrazioni o oggetti con specifiche proprietà. Utilizzando la definizione di stimolo (si veda la slide precedente), può essere descritta ognuna delle primitive della classe *perception*, poiché ogni singola primitiva può essere applicata solo ad alcuni stimoli aptici:

- *Identification*: come la primitiva *discrimination*, anche tale primitiva è basata sul fatto che sia presente e che sia stato rilevato più di uno stimolo. Questi stimoli tuttavia non vengono confrontati tra loro, ma vengono confrontati con conoscenze pratiche o astratte per consentire una classificazione delle informazioni in essi contenute. Un esempio di compito di questo tipo è l'identificazione delle proprietà geometriche degli oggetti, come le dimensioni e la forma.
- *Scaling*: tale primitiva permette una valutazione delle proprietà degli stimoli e degli oggetti; essa dà informazioni quantitative sui segnali.

TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Interazione Aptica

La classe *motor control* comprende le primitive *travel*, *selection* e *modification*. Tali primitive possono essere descritte tenendo in considerazione compiti di interazione generale:

- *Travel*: il movimento o lo spostamento di arti, dell'intero corpo o di sostituti virtuali (avatar) è utilizzato per cercare o raggiungere una destinazione o un oggetto, per esplorare ambienti (sconosciuti) o per cambiare la propria posizione. La modifica di un movimento già in corso è inclusa in questa primitiva.
- *Selection*: specialmente negli ambienti virtuali, la marcatura e/o la selezione di un oggetto o di una funzione è una primitiva cruciale. Essa consente innanzitutto un'interazione diretta in questi ambienti.
- *Modification*: tale primitiva si basa sulla selezione di una funzione o di un oggetto. Essa descrive una modifica dell'orientamento, della posizione o di altre proprietà di un oggetto.

TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Interazione Aptica

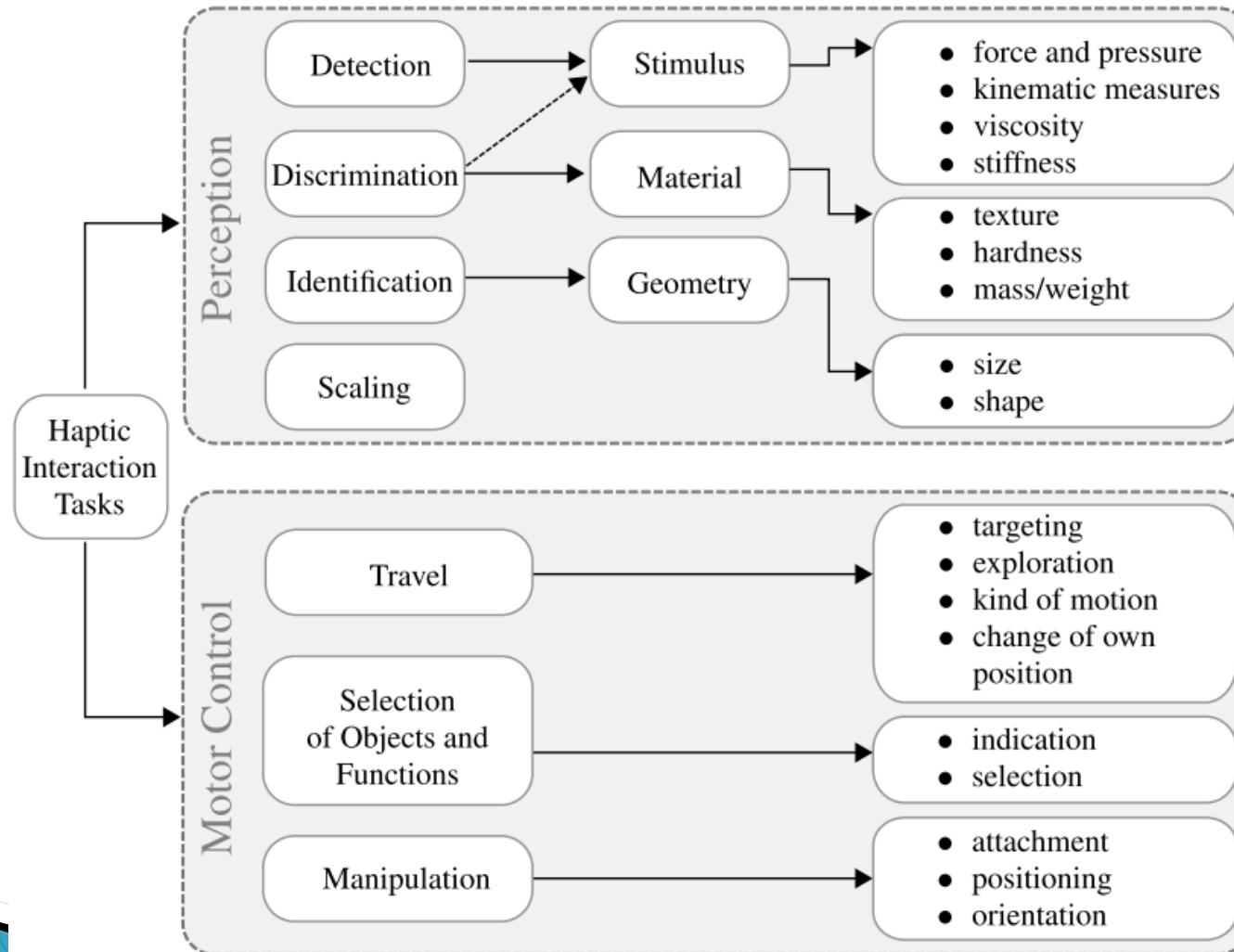
Quando si utilizzano le primitive della classe *motor control*, al fine di ottenere una descrizione accurata dell'interazione non si deve considerare solo l'operazione ma anche lo scopo dell'operazione. Se, ad esempio, si utilizza un computer con un mouse come dispositivo di input e si seleziona un'icona sullo schermo, questa interazione può essere descritta come una primitiva *travel* o come una primitiva *selection*. Un'analisi più attenta rivelerà probabilmente che la primitiva *travel* viene utilizzata per raggiungere un oggetto sullo schermo. Questo oggetto viene selezionato in un passaggio successivo. Se questa interazione deve essere eseguita con un nuovo tipo di dispositivo aptico, la primitiva *travel* è probabilmente considerata subordinata alla primitiva *selection*.

È stata introdotta una tassonomia associata all'interazione aptica basata sulle due classi appena descritte (si veda la figura riportata nella slide seguente).

TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Interazione Aptica



Tassonomia associata all'interazione aptica.

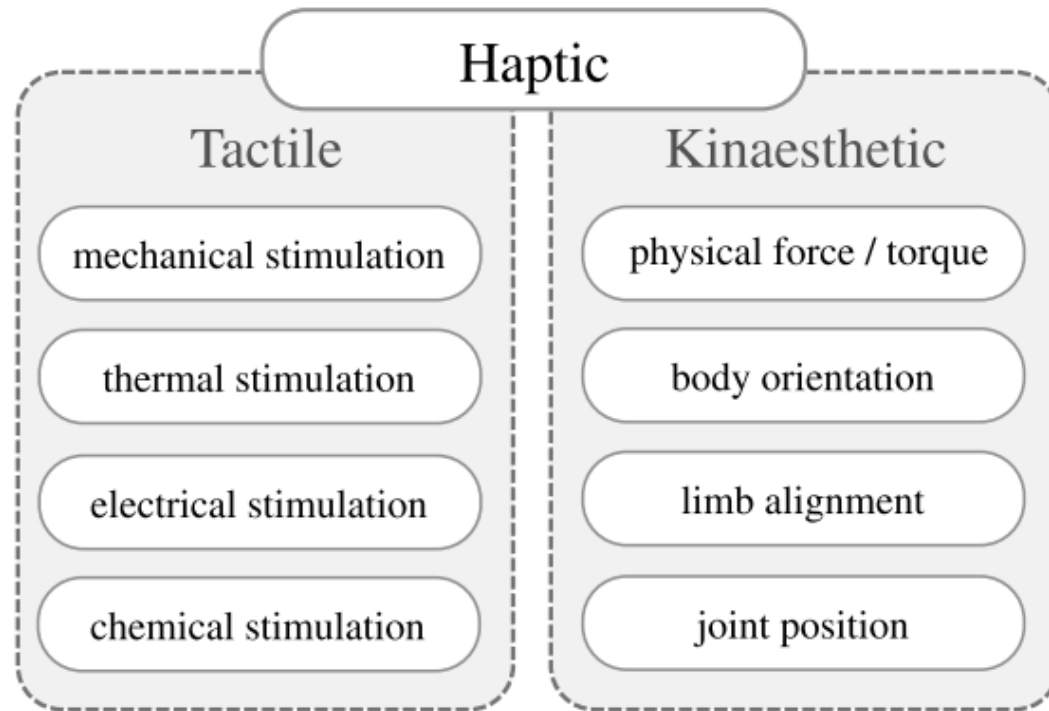
' VIRTUALE

TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Percezione Aptica

Lo standard ISO 9241-910 definisce una tassonomia associata alla percezione aptica (si veda la figura); tale tassonomia è basata sulla fisiologia e definisce la percezione solo in base alla posizione dei recettori sensoriali. In base alla tassonomia riportata, la percezione tattile è basata esclusivamente sui recettori cutanei. Questi includono non solo recettori meccanici, ma anche recettori per la temperatura, chimici (ad esempio, il

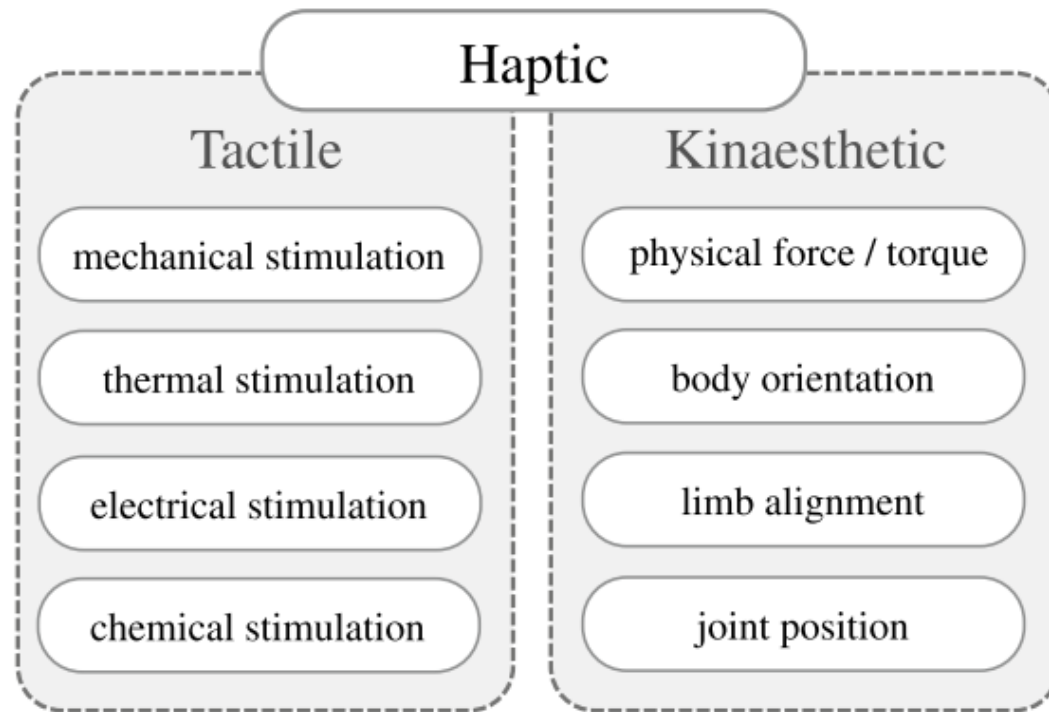


TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Percezione Aptica

gusto) e il dolore. Rispetto alla percezione della temperatura e del dolore, l'interazione meccanica è più funzionale nei sistemi aptici progettati per compiti specifici in termini di usabilità e generalizzazione. Tuttavia l'interazione meccanica è molto più complessa a causa della complessità dei meccanorecettori e delle dinamiche ad essi connesse.



TECNOLOGIE APTICHE

Definizioni tecniche

Percezione Aptica

Riguardo agli stimoli meccanici, possiamo definire la percezione cinestetica e tattile come segue:

- Percezione cinestetica: essa descrive la percezione dello stato operativo dell'apparato locomotore umano, in particolare le posizioni delle articolazioni, l'allineamento degli arti, l'orientamento del corpo e la tensione muscolare. Per quanto riguarda la tassonomia associata all'interazione aptica, la percezione cinestetica è principalmente coinvolta nelle primitive della classe *motor control*, poiché i segnali cinestetici sono necessari nel circuito di controllo biologico per il posizionamento degli arti.
- Percezione tattile: essa descrive la percezione basata sui recettori sensoriali situati sulla pelle umana. Rispetto ai recettori cinestetici, essi sono coinvolti principalmente nelle primitive della classe *perception*.

TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

Telepresenza, teleoperazione e sistemi di assistenza

In una definizione rigorosa di sistemi TPTA (telepresence and teleaction) non c'è un accoppiamento meccanico diretto tra l'operatore e l'ambiente manipolato, ma solo attraverso il sistema TPTA. In questo modo la trasmissione di segnali aptici è possibile, poiché l'interazione meccanica viene convertita in altri domini (principalmente elettrico) e può essere trasmessa più facilmente. I sistemi TPTA spesso sono dotati di ulteriori funzioni multimodali (esempio: un canale visivo unidirezionale che mostra l'ambiente all'operatore del sistema TPTA).

Tra gli esempi vi sono sistemi per l'assemblaggio sott'acqua, quando le indicazioni visive sono inefficaci a causa di particelle disperse nell'acqua, il supporto in scala in micro e nano mondi e le applicazioni chirurgiche. L'uso di sistemi TPTA riduce il tempo di completamento del compito e minimizza gli errori e le forze di manipolazione rispetto ai sistemi senza feedback aptico. Nelle applicazioni chirurgiche sono possibili nuove combinazioni di tecniche finora sconosciute, come ad esempio la palpazione nella chirurgia minimamente invasiva. Gli studi dimostrano anche un aumento della sicurezza per i pazienti.

TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

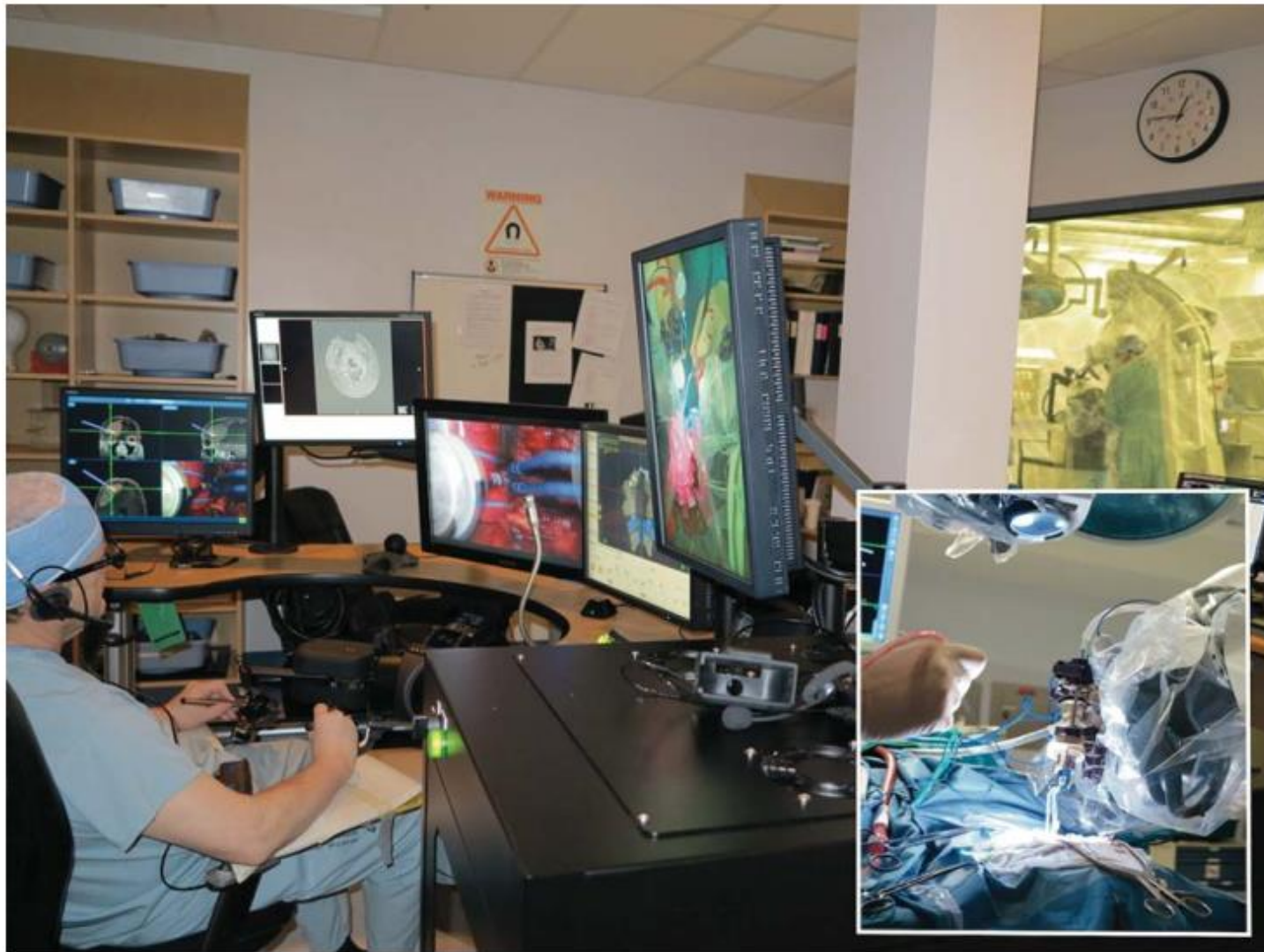
Nella figura è riportato *Quanser*, una tecnologia che include un'interfaccia aptica e un braccio robotico. Utilizzando tale combinazione, possono essere progettati scenari per ottenere una teleoperazione bilaterale. Un esempio è *neuroArm* (si vedano le figure delle slide seguenti), un sistema di teleoperazione progettato per interventi neurologici. In molti interventi è richiesta una elevata accuratezza e l'utilizzo in tempo reale di informazioni prodotte da immagini MRI (Magnetic Resonance Imaging).



Slide 10: Teleoperazione flessibile mediante Quanser: interfaccia aptica con feedback aptico e Denso robot.

TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione



La workstation neuroArm è distante dalla sala operatoria (sinistra). Il robot neuroArm è dotato di pinze nel manipolatore di destra e di un aspiratore in quello di sinistra (destra).

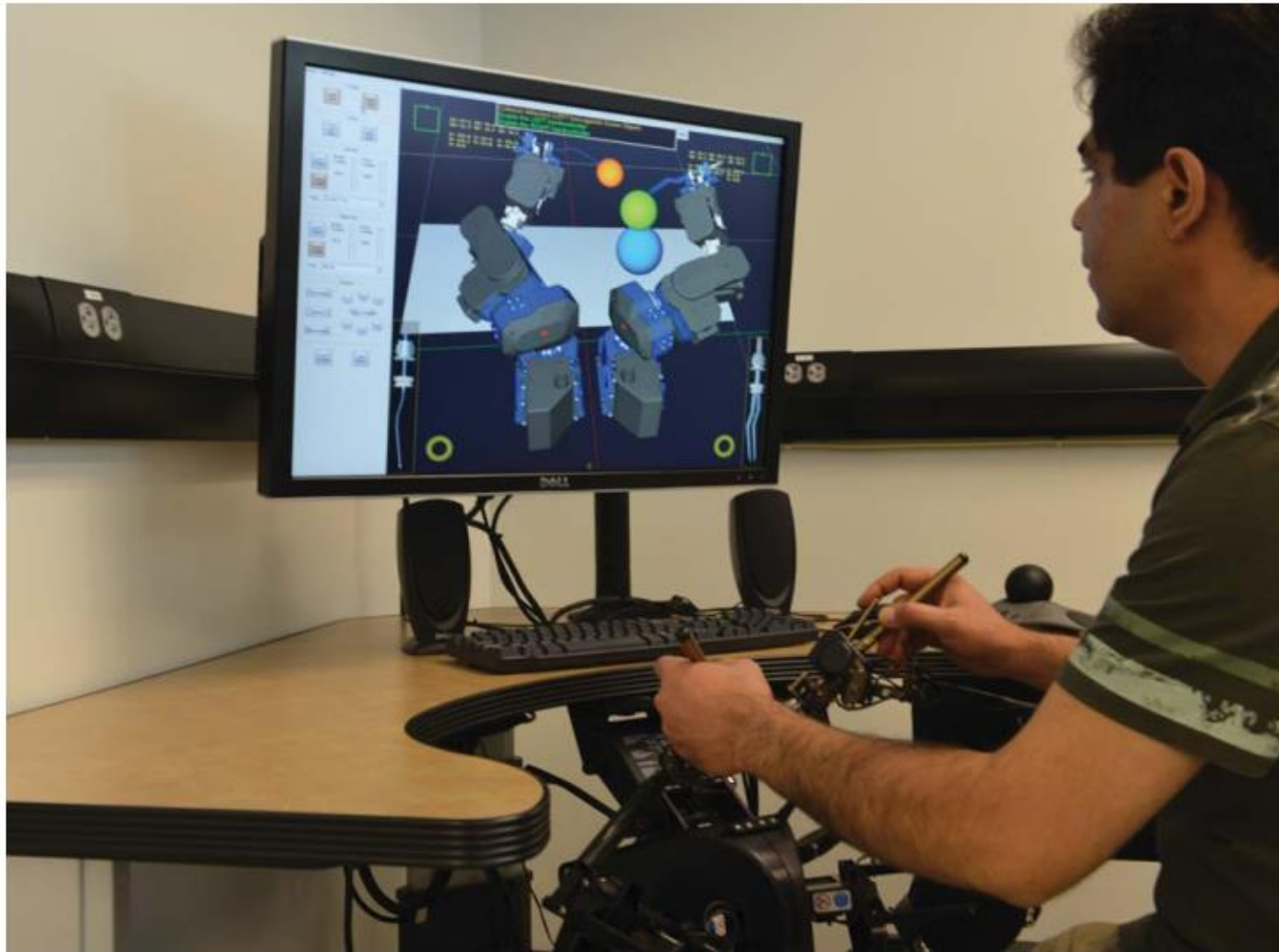
TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione



TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

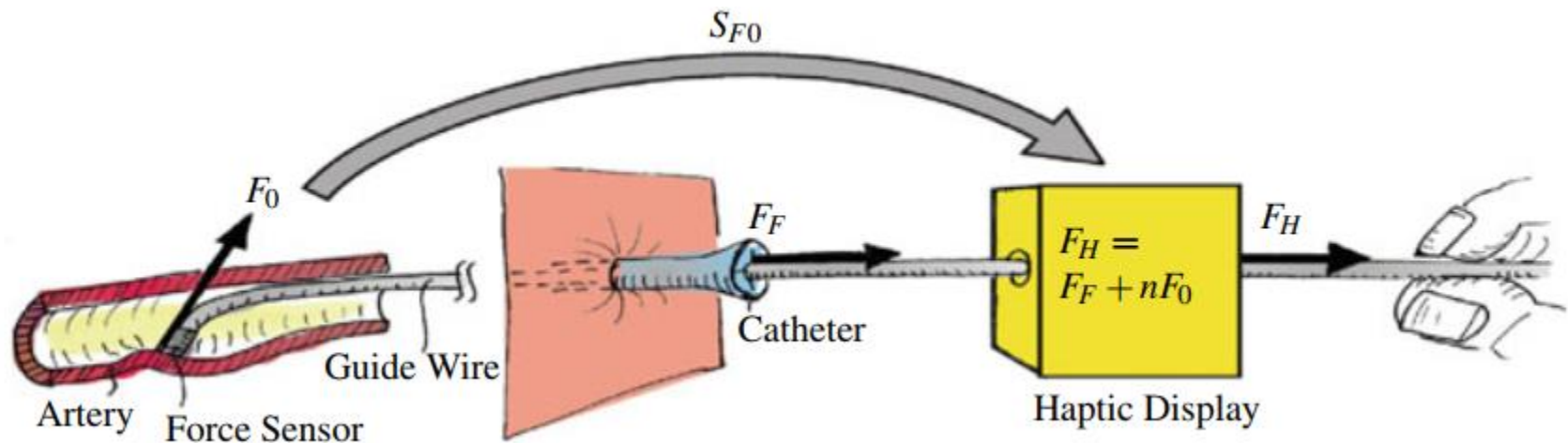


neuroArm virtual trainer: il trainer ha l'obiettivo di istruire il chirurgo nell'utilizzo dei sistemi neuroArm. In questo caso, il compito consiste nell'utilizzare la mano per costruire un pupazzo di neve da una serie di sfere; tale compito richiede precisione e accuratezza.

TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

Una categoria di sistemi TPTA è rappresentata dai co-manipolatori. Tali sistemi vengono utilizzati principalmente in applicazioni mediche. Nonostante l'interazione meccanica sul sistema TPTA, un'ulteriore manipolazione dell'ambiente (e un feedback) può essere esercitata da parti del sistema. Un esempio di co-manipolatore è il sistema HapCath (Haptic Catheter), il quale fornisce feedback aptico e viene utilizzato negli interventi cardiovascolari (si veda la figura).



Schema del co-manipolatore HapCath. La forza F_0 sulla punta della guida viene misurata da un sensore di forza. Il segnale S_{F0} viene trasmesso all'esterno del corpo del paziente attraverso la guida. All'interno di un display aptico il segnale S_{F0} viene convertito in una forza scalata $n \cdot F_0$ da amplificatori e attuatori, superando quindi la forza di attrito F_F all'interno del catetere e dei vasi sanguigni. Tale forza viene percepita (displayed) sulla mano del chirurgo come forza amplificata F_H .

TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

Ambienti virtuali

I sistemi aptici sono utilizzati nell'interazione con ambienti virtuali per diversi scopi:

- Medical Training: molti sistemi sono stati progettati per fornire formazione medica senza mettere a rischio un paziente reale. Oltre al feedback aptico, questi sistemi forniscono generalmente anche un feedback visivo e acustico per generare un'impressione realistica della procedura simulata. Si possono trovare sistemi per addestrare alla diagnosi di lesioni articolari e simulatori per interventi endoscopici, laparoscopici (si veda la figura) e intravascolari.

Simulatore laparoscopico LAP MENTOR III. Il simulatore è stato progettato per simulare interventi addominali.



TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

Ambienti virtuali

I sistemi aptici sono utilizzati nell'interazione con ambienti virtuali per diversi scopi:

- Progettazione industriale: nelle applicazioni di progettazione industriale, gli ambienti virtuali sono utilizzati per simulare le operazioni di assemblaggio e la valutazione soggettiva dei prototipi.
- Display informativi multimodali: un esempio di display multimodale è il TOUCHMOVER (si veda la figura). Esso è uno schermo attuato con feedback aptico che può essere utilizzato per visualizzare le proprietà degli oggetti e dei materiali o per accedere in modo intuitivo ad alcuni dati, come ad esempio le scansioni MRI.

TOUCHMOVER con utente che esplora i dati MRI.



TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

Ambienti virtuali

I sistemi aptici sono utilizzati nell'interazione con ambienti virtuali per diversi scopi:

- Elettronica di consumo: un esempio in tale ambito è il sistema BUTTKICKER.

Attuatore elettrodinamico BUTTKICKER per la generazione di oscillazioni a bassa frequenza in una sedia da gaming.



TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

Comunicazione

Il più grande campo di applicazione dei sistemi aptici è quello della comunicazione (si veda la figura).



a)



b)



c)



d)

Componenti e sistemi per la comunicazione tramite senso aptico. (a) Eccitatore per touchpad e dispositivi mobili. (b) Sistema HYPERBRAILLE per rendere accessibile le informazioni grafiche ad utenti con disabilità visiva. (c) Sistema LORMER utilizzato come interfaccia uomo-macchina per la trasmissione di informazioni testuali mediante l'alfabeto di Lorm sul palmo e sulla mano dell'utente. (d) TACTILE TORSO DISPLAY: giubbotto per la segnalazione delle informazioni di volo sul torace del pilota.

TECNOLOGIE APTICHE

Aree di applicazione

Altre aree di applicazione

Un esempio di ulteriori aree di applicazione è rappresentato dalla realizzazione di mani o arti robotici dotati di sensori per la percezione (si veda la figura).



Mano robotica Shadow Dexterous Hand con integrazione di sensori tattili BIOTACS. Tale sistema permette la manipolazione della forza e della direzione per ogni polpastrello.

Riferimenti Bibliografici

- [1] Kern, T. A., Hatzfeld, C., Abbasimoshaei, A. (2023). Engineering Haptic Devices. Springer. ISBN: 978-3-031-04535-6
- [2] Kraiss, K. -F. (2006). Advanced Man-Machine Interaction: Fundamentals and Implementation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN-10: 3-540-30618-8