

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



Finito di scrivere il giorno 19 settembre 2010 utilizzando L^AT_EX 2_ε

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—
DIPARTIMENTO DI INNOVAZIONE MECCANICA E GESTIONALE

—
TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

SISTEMI ROBOTICI INTERAGENTI CON L'UOMO

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: ADRIANO SALATA

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

a mia nonna Silvana...

“ Perchè una realtà non ci fu data e non c'è; ma dobbiamo farcela noi, se vogliamo essere; e non sarà mai una per sempre, ma di continuo e infinitamente mutabile... ”

LUIGI PIRANDELLO

Indice

Sommario	XI
Introduzione	XIII
1 Classificazione delle interfacce aptiche	1
1.1 Force feedback e tactile feedback	1
1.1.1 Propriocezione e cinestesia	2
1.2 Dispositivi non portatili	2
1.2.1 Interfacce con master fissato al tavolo	3
1.2.2 Interfacce con master fissato al pavimento o al soffitto	6
1.3 Dispositivi portatili	11
1.3.1 Esoscheletri per le braccia	12
1.3.2 Esoscheletri per le mano	13
1.4 Confronto tra le interfacce aptiche	16
2 Controllo delle interfacce aptiche	19
2.1 Considerazioni preliminari	19
2.2 Stabilità e valutazione delle performance	20
2.3 Tipologie di controllo	24
2.4 Controllo e ottimizzazione della trasparenza	25
2.5 Analisi delle performance e della stabilità	29
2.6 Discussione e conclusioni	36
3 Attuazione dei dispositivi	39
3.1 Attuatori elettrici	40
3.1.1 Motori DC	40

3.1.2	Freni a particelle magnetiche	41
3.2	Attuatori idraulici	42
3.3	Attuatori pneumatici	42
3.4	Nuove tipologie di attuatori	43
3.4.1	Attuatori piezoelettrici	43
3.4.2	Attuatori magnetorestrittivi	44
3.4.3	Polimeri elettroattivi	44
4	Esempi di dispositivi aptici	45
4.1	Dispositivi aptici in commercio	45
4.1.1	PHANToM Master	45
4.1.2	HAPTIC Master	46
4.1.3	CyberForce Glove	48
4.2	Prototipi di dispositivi aptici	50
4.2.1	Joystick sferico di Adelstein-Rosen	50
4.2.2	PiRoGa5	50
4.2.3	SPIDAR	52
4.2.4	JPL Universal Master	54
4.2.5	Shape approximation device	56
	Conclusioni	59
	Bibliografia	65

Sommario

Questa tesi si inserisce nel campo dell'interazione tra uomo e sistemi robotici trattando gli aspetti più importanti delle interfacce aptiche, dei dispositivi in grado di simulare all'operatore che li utilizzano una realtà virtuale creata col computer o l'ambiente in cui si trova un manipolatore remoto. Queste nuove tecnologie hanno visto un grande sviluppo negli ultimi vent'anni e si sono via via diversificati in base alle necessità di utilizzo e grazie alla nascita di strumenti, materiali e componenti sempre più sofisticati, miniaturizzati e leggeri. I quattro capitoli di cui la tesi è composta trattano quindi i seguenti argomenti:

Capitolo 1: contiene una panoramica generale sulle interfacce aptiche, specificando le tipologie, la loro struttura e le caratteristiche che le differenziano tra loro, prestando particolare attenzione ai possibili utilizzi e agli sviluppi rispetto ai primi prototipi.

Capitolo 2: presenta il controllo delle interfacce aptiche, concentrandosi sulle tre caratteristiche di interesse, cioè la stabilità, la trasparenza e le performance.

Capitolo 3: da una breve descrizione delle principali tipologie di attuatori utilizzati descrivendo le caratteristiche che li rendono adatti al loro scopo.

Capitolo 4: contiene alcuni esempi di interfacce aptiche, in particolare i principali dispositivi attualmente in commercio e alcuni prototipi che rappresentano delle tappe importanti nello sviluppo.

Introduzione

L'interazione tra uomo e macchina avviene tramite delle interfacce aptiche (haptic interfaces), che permettono all'operatore di toccare e manipolare oggetti tridimensionali in ambienti virtuali o in sistemi di teleoperazione.

Il termine **aptico** deriva dal greco haptikos e sta ad indicare tutto ciò che ha a che fare con la sensazione tattile. Con il termine **interfaccia aptica** si indica ciò che si trova tra l'operatore e l'ambiente (virtuale o reale), in particolare il **display aptico**, cioè un dispositivo meccanico che è in grado di trasmettere sensazioni di forza mediante l'opposizione di un'impedenza meccanica alla mano umana.

Le comuni periferiche dei computer sono dispositivi di input, che permettono esclusivamente un flusso di informazione dall'utente al calcolatore. Le interfacce aptiche, invece, sono dispositivi di input/output che prendono traccia dei movimenti della mano dell'operatore (input), e gli danno la sensazione di toccare realmente ciò che vede nello schermo (output). Questa caratteristica permette il loro utilizzo in tutte le applicazioni nelle quali la sola retroazione visiva non è sufficiente a garantire un corretto svolgimento dell'operazione voluta.

Tali applicazioni possono essere suddivise in tre categorie principali:

- la *teleoperazione* con retroazione di forza, ad esempio operazione ed esplorazioni spaziali, sottomarine e minerarie, chirurgia telerobotizzata e microassemblaggio;
- la simulazione del contatto con *ambienti virtuali*, ad esempio simulazione di interventi chirurgici, riabilitazione, prototipazione e sistemi di intrattenimento;

- l'*assistenza diretta* all'operatore nell'interazione con l'ambiente fisico, ad esempio moltiplicatori di forza e sistemi di guida virtuali.

In generale le interfacce aptiche sono dei sistemi di tipo master-slave, in cui l'operatore comanda lo slave remoto inviando i comandi tramite il master.

Nel caso della teleoperazione, dunque, l'interfaccia aptica è costituita dal display aptico manipolato dall'operatore (*master*), dal robot che opera a diretto contatto con l'ambiente fisico (*slave*), dai controllori del master e dello slave e dai sistemi di controllo che gestisce il flusso di informazioni tra essi.

Nel caso della simulazione di ambienti virtuali, l'interfaccia aptica è costituita dal display aptico, dal suo controllore e dal sistema di controllo che gestisce lo scambio di informazioni con l'ambiente virtuale.

Nel caso dell'interazione assistita con l'ambiente fisico, l'interfaccia aptica è costituita dal display aptico, dal suo controllore e dal sistema di controllo che gestisce le informazioni provenienti dai sensori traducendoli in ingressi per il controllo del display.

Da un punto di vista storico il primo dispositivo a ritorno di forza fu sviluppato da Goerz nel 1954 per la teleoperazione in ambienti radioattivi. Questo dispositivo aveva il master collegato meccanicamente allo slave. Nel 1967 Frederick Brooks e i suoi colleghi dell'università del North Carolina diedero vita al progetto GROPE, che venne portato avanti fino al 1990. In particolare si occuparono della simulazione tridimensionale in tempo reale delle forze nell'accoppiamento molecolare. Nello stesso periodo un gruppo di ricerca del laboratorio aeronautico Cornell costruirono il primo esoscheletro, costituito da un master interno che prendeva traccia dei movimenti di entrambe le gambe e le braccia e uno slave esterno utilizzato per amplificare la forza dell'utente. Successivamente, nel 1981, Zarudansky progettò un braccio meccanico con retroazione di forza da ogni dito della mano che era costituito da un involucro esterno contenente 28 attuatori e da un guanto interno indossato dall'operatore [1].

Queste prime interfacce aptiche utilizzavano un controllo a livello del giunto, e ciò imponeva una similitudine cinematica tra master e slave. Negli anni '80, però, i ricercatori della NASA svilupparono dispositivi di teleoperazione per missioni di riparazione nello spazio, introducendo un controllo nello spazio cartesiano

basato sull'utilizzo del computer, che permise l'utilizzo di master e slave con configurazioni cinematiche differenti. Si raggiunse quindi il massimo della flessibilità quando il robot utilizzato come slave venne sostituito da un duplicato virtuale [2].

I primi display aptici commerciali comparvero sul mercato a partire dal 1993, quando vennero introdotti il Touch master e lo SAFIRE master. Essi vennero presto seguiti dal PHANTOM e dall' Impulse Engine [3]. Negli ultimi anni ci si è mossi anche nel campo dell'intrattenimento, ad esempio con il WingMan della Logitech e il Treadport (Sarcos Inc.).

Capitolo 1

Classificazione delle interfacce aptiche

1.1 Force feedback e tactile feedback

“Toccare” può essere definita come la sensazione che si ha quando la pelle è soggetta a stimoli di tipo meccanico, chimico ed elettrico [4]. Le interfacce aptiche sfruttano in particolare due sensazioni, quella di forza e quella tattile. Per dare una prima classificazione introduciamo le seguenti definizioni:

retroazione tattile (tactile feedback): è una sensazione della pelle, generalmente in risposta al contatto a ad altre azioni nel mondo virtuale. Questa retroazione è percepita dai ricettori della pelle, che hanno una larghezza di banda elevata (50-350 Hz) e permettono di riconoscere ad esempio le forme geometriche, la ruvidità delle superfici e la temperatura;

retroazione di forza (force feedback): è la sensazione del peso e della resistenza. La retroazione di forza richiede un dispositivo che produca una forza al corpo umano che sia equivalente o proporzionale a quella di un oggetto reale o virtuale. Ciò permette all’operatore di sentire il suo peso o la resistenza al moto da esso creata.

Questa tesi tratterà principalmente i dispositivi a ritorno di forza, più precisamente quelli a **retroazione cinestetica (kinesthetic feedback)**, che fanno riferimento alla propiocezione, cioè alle sensazioni trasmesse dai ricettori situati

sui muscoli, sulle giunture, sui tendini e stimolati dal movimento del corpo.

1.1.1 Propriocezione e cinestesia

La propriocezione è la percezione della posizione e del movimento del proprio corpo. Il senso della posizione fa riferimento agli angoli delle giunture scheletriche, e a seguito di un movimento alcuni ricettori presenti in esse vengono più o meno compressi e inviano le informazioni necessarie al sistema nervoso per darci la sensazione corretta del movimento compiuto.

Come in ogni catena cinematica, vi è un certo errore angolare alle varie giunture, che aumenta più ci si allontana da quella collegata direttamente alla base. Si ha infatti che la precisione massima è quella dei ricettori dell'anca (incertezza di 0.2°), mentre quella più bassa corrisponde a quella delle punte delle dita (6.10°) [5]. È molto importante tenere conto di questi errori angolari, infatti le parti del corpo che sono generalmente portate ad interagire con le interfacce aptiche sono le punte delle dita, cioè quelle che danno una maggior incertezza nella sensazione di posizione.

Per questi dispositivi a retroazione cinestetica è possibile una successiva suddivisione in base al tipo di master di cui sono composti. Si possono individuare i dispositivi non portatili, in cui il master è generalmente di grandi dimensioni e il cui peso è sostenuto da una superficie stabile, come il tavolo o il pavimento, e i dispositivi portatili, più leggeri e trasportati direttamente dall'operatore.

1.2 Dispositivi non portatili

Fissare con dei vincoli meccanici i dispositivi ad una superficie è spesso necessario per garantire l'equilibrio e la stabilità del dispositivo stesso. I luoghi in cui il master può essere fissato sono ad esempio il tavolo, il pavimento, il soffitto, le pareti e tutte le superfici che siano in grado di sostenere il peso dell'intero dispositivo.

Di seguito vengono descritte le varie tipologie di interfacce non portatili effettuando successivamente un confronto tra le forze che sono in grado di imprimere, i gradi di libertà e altri aspetti di interesse.

1.2.1 Interfacce con master fissato al tavolo

Sono i dispositivi più diffusi, infatti hanno costi contenuti e sono i più semplici da installare. Tra questi possiamo individuare i joystick, i pen-based, i dispositivi a corda e i guanti di percezione.

Joystick

I joystick sono generalmente costituiti da un braccio meccanico a due gradi di libertà (DoF) in grado di ruotare su un giunto sferico rispetto a due assi a cui vengono fissati dei potenziometri, e vengono detti appunto joystick sferici. L'utente può quindi impugnare una manopola presente sull'estremità superiore del braccio e muoverlo nelle due direzioni. I potenziometri misurano quindi la variazione di posizione rispetto a quella angolare (generalmente quella verticale) e inviano le informazioni di ingresso al computer. La retroazione di forza è quindi data da due attuatori situati sugli assi di rotazione (uno per ogni DoF). È importante eliminare la molla di ritorno, per non confondere l'utente che utilizza il dispositivo. Vi possono essere joystick a più di due DoF, fino ad un massimo di sei, che richiederanno però un numero maggiore di attuatori.

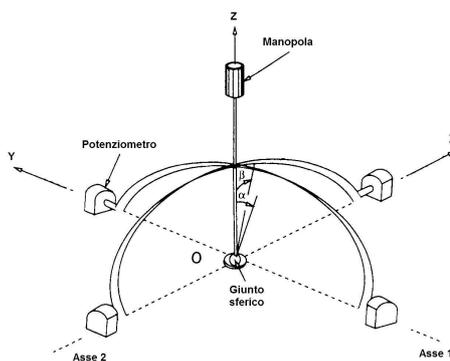


Figura 1.1: Rappresentazione di un joystick sferico

Esistono anche altre tipologie di joystick, ad esempio quelli cartesiani che, a differenza di quelli sferici, hanno due assi cartesiani su cui l'intera base dell'impugnatura può traslare permettendo all'utente una maggior mobilità, ma richiedendo anche più spazio a disposizione. La base poggia su quattro carrelli in grado di

muoversi in linea retta su altrettante rotaie, due delle quali possiedono un motore a corrente continua che azionano il movimento. Sono presenti inoltre dei sensori di forza che misurano la differenza tra la forza del meccanismo e quella applicata dall'operatore. Un terzo motore rotante è quindi aggiunto alla base per ottenere un joystick a tre gradi di libertà, con un'accuratezza di 0.006 radianti e una ripetibilità complessiva che può raggiungere valori di 0.03 mm.

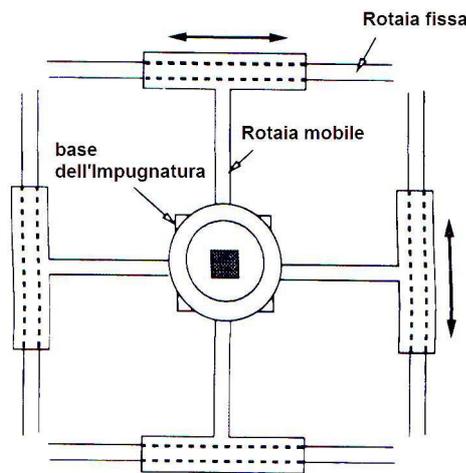


Figura 1.2: Rappresentazione di un joystick cartesiano

Uno degli ultimi joystick prodotti è quello a joystick a levitazione magnetica che, non avendo alcun tipo di attrito, permette di ottenere una sensibilità molto più elevata rispetto agli altri dispositivi e una risoluzione dell'ordine di qualche μm . Esso è costituito da una impugnatura a sei DoF inserito all'interno di una serie di magneti assemblati in verticale, che creano un campo magnetico in cui sono immerse le bobine di sei attuatori di Lorenz disposti in configurazione a stella. La corrente che attraversa gli attuatori provoca un riscaldamento a causa dell'effetto Joule, limitando l'utilizzo prolungato del dispositivo e le forze e le coppie ad essa proporzionali.

Pen-based

I master di tipo pen-based permettono all'operatore di interagire con il mondo virtuale tramite uno strumento familiare come una penna o un bisturi, sfruttando uno spazio di lavoro più esteso rispetto ai joystick, pur essendo estremamente

compatti. Essi hanno dai tre ai sei DoF e avendo una forma geometrica fissata non richiedono calibrazioni in base alla dimensione della mano dell'utente.

Esistono varie implementazioni di queste interfacce aptiche, ad esempio uno dei primi era costituito da una configurazione cinematica su cui poggiava una piattaforma circolare che veniva spostata lungo il suo piano da tre attuatori e inclinata da altri due. Una fenditura al centro della piattaforma permetteva quindi di collegare la penna al braccio meccanico e di manovrare il dispositivo utilizzando un solo dito. Il più comune dispositivo pen-based è il PHANToM, che verrà descritto nel dettaglio in seguito.

Master a corda

I master a corda sono dei display aptici che utilizzano dei sottili cavi per applicare delle forze alla mano dell'utente permettendo di avere un peso molto limitato, delle basse inerzie e uno spazio di lavoro di dimensione variabile dipendente esclusivamente dalla lunghezza dei cavi. In generale la struttura è cubica, e gli attuatori sono posizionati sulle sue pareti, lontano dalla mano dell'operatore. Il problema principale di questo master è che ogni cavo permette di applicare una forza in una sola direzione, quindi, per ottenere delle forze e delle coppie tridimensionali è necessario utilizzare molti cavi, che potrebbero interferire tra loro e con la mano dell'utente. Ad esempio, per ottenere sei DoF, sono necessari nove cavi, collegati a gruppi di tre ad un'impugnatura a T che si trova al centro della struttura ed è sostenuta da tre cilindri ad aria. Gli attuatori pneumatici applicano quindi una forza alla manopola per compensare quella prodotta dagli attuatori collegati ai cavi.

Per determinare la posizione nello spazio della manopola si utilizzano dei potenziometri, che misurano la lunghezza dei vari cavi mantenuti sempre in tensione da dei motori brushless a corrente continua. Questo dispositivo permette di generare una forza di circa 40 N e una coppia di 5 Nm, ma ha lo svantaggio che l'elevato attrito all'interno del meccanismo maschera le retroazioni di forza più piccole e rende difficile effettuare movimenti precisi.

Guanti di percezione (sensing glove)

L'ultima interfaccia aptica non portatile trattata è il guanto di percezione, cioè un esoscheletro meccanico vincolato al tavolo che possiede una parte a tre gradi di libertà in cui l'utente infila il polso e ha la possibilità di effettuare un movimento rotatorio. Inoltre le dita della mano vengono inserite in altri dispositivi meccanici che danno delle retroazioni indipendenti, ad esempio l'indice ha tre DoF, il pollice ne ha due e le altre tre dita sono raggruppate in un unico supporto con due DoF. In totale si hanno quindi 10 DoF, che sono meno di quelli della mano (26), ma permettono comunque di simulare gran parte delle azioni che essa può compiere.

Dal momento che la posizione delle varie parti del dispositivo dipende dalla dimensione della mano dell'operatore, è necessaria effettuare una calibrazione che mette in relazione gli angoli dell'esoscheletro alle posizioni cartesiane della punta delle dita.

1.2.2 Interfacce con master fissato al pavimento o al soffitto

In generale le interfacce fissate al pavimento o al soffitto sono più grandi, più complesse e più costose di quelle da tavolo, inoltre, a causa della grande forza di uscita che possono imprimere, l'aspetto della sicurezza diviene più critico. Possiamo distinguere tra questi i master universali, le braccia robotiche le piattaforme di movimento e gli esoscheletri.

Master universali

Inizialmente le interfacce aptiche richiedevano che il master e lo slave fossero identici, in modo tale da rilevare il movimento dell'utente tramite il master e riprodurlo fedelmente dallo slave remoto. Ciò era necessario perchè i computer di allora non avevano la potenza necessaria ad effettuare una complessa trasformazione cinematica in tempo reale, essenziale per poter utilizzare uno slave diverso dal master. Lo sviluppo dei computer rese però possibile la creazione di master universali che erano in grado di comandare un qualsiasi tipo di slave, portando presto alla nascita degli slave virtuali utilizzati nella simulazione di ambienti reali. Esistono differenti implementazioni di queste interfacce, che in generale sono

costituite da una manopola in grado di ruotare in una o più direzioni fissata ad un braccio meccanico che può ruotare o traslare. Nel primo caso abbiamo ad esempio il master JPL avente una manopola in grado di ruotare in tre direzioni diverse e di traslare e ruotare attorno ad un supporto fissato al pavimento, ottenendo un totale di sei DoF, e il suo antagonista MEL, che aveva quattro DoF (traslazione tridimensionale e rotazione). Nel secondo caso abbiamo un manipolatore cartesiano, in cui il braccio meccanico è in grado di traslare lungo due direzioni e la manopola è in grado di traslare lungo una terza ortogonale alle prime due e di ruotare lungo tre assi di rivoluzione tra loro ortogonali. A differenza dei dispositivi visti in precedenza, esso ha un sensore di forza sulla manopola, che legge le forze impresse dall'utente, permettendo un controllo in retroazione forza-posizione, piuttosto che posizione-forza. Il problema principale dell'utilizzare un sensore di questo tipo è che si hanno delle forti vibrazioni e delle risonanze quando l'utente impugna con troppa forza la manopola, ma si possono ridurre significativamente modificando dinamicamente i guadagni del controllo in retroazione.

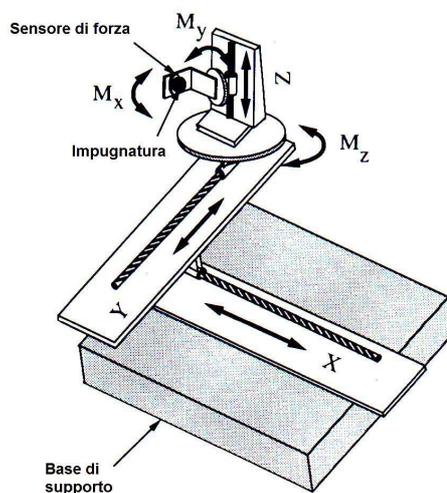


Figura 1.3: Schema del manipolatore Cartesiano a sei DOF.

Braccia robotiche

I robot vennero utilizzati a partire degli anni ottanta nelle industrie per eseguire semplici compiti ripetitivi ad alta velocità, in modo da aumentare al massimo la produttività. Al giorno d'oggi i robot industriali hanno complicate catene cine-

matiche ed è possibile effettuare un controllo di posizione in tempo reale tramite dei computer chiamati controllori, che sono anche in grado di comunicare con altri calcolatori più potenti; possono, inoltre, essere utilizzati nelle teleoperazioni tramite un master in grado di effettuare un comando a distanza da parte dell'utente, che può quindi svolgere operazioni in ambienti difficilmente raggiungibili o pericolosi. Più recentemente vengono utilizzati nella simulazione di realtà virtuali, in cui un manipolatore robot a sei DoF rileva le forze applicate ad un'impugnatura tramite un sensore e le invia attraverso delle linee seriali ad un computer che sta eseguendo la simulazione. Queste forze vengono quindi associate a variazioni di velocità degli oggetti virtuali o a forze di contatto in base al tipo di simulazione, e la retroazione viene inviata al controllore del robot sottoforma di coordinate spaziali (retroazione di posizione). Un'altro utilizzo delle braccia robotiche nella realtà virtuale è come supporto per le interfacce aptiche, ad esempio per tenere sollevato un pesante esoscheletro con varie spire in grado di produrre un campo magnetico necessario a far levitare una struttura che avvolge completamente il dito dell'operatore e permette di applicare una forza a tutte le sue articolazioni. Questa struttura permette di simulare il peso e l'inerzia di oggetti virtuali, azione che non può essere svolta da interfacce aventi soltanto una impugnatura per l'utente. Il robot è necessario per seguire il movimento della mano dell'utente, infatti vengono inseriti dei fotoemettitori e dei fotoricettori in grado di tracciare la posizione della punta delle dita e di inviare tali informazioni al controllore del robot, che muove l'intera struttura in corrispondenza alle variazioni di posizione. I vantaggi principali di questo dispositivo sono che non richiede il passaggio della corrente quando non vi è una retroazione di forza, ha attrito praticamente nullo e ha uno spazio di lavoro molto grande che incrementa la libertà di movimento dell'utente.

Piattaforme mobili

Le piattaforme mobili distribuiscono la retroazione di forza lungo tutto il corpo dell'utente. Inizialmente furono progettate per gli addestramenti militari, ma vennero successivamente sviluppate per sofisticati sistemi di intrattenimento come videogiochi o cinema, in cui i movimenti e le vibrazioni della sedia in relazione a

ciò che veniva proiettato permettevano di esaltare notevolmente l'esperienza dello spettatore. Il nascere di nuove tecnologie hanno reso possibile una produzione di piattaforme sempre più compatte e in grado di sostenere pesi elevati, pur mantenendo i costi relativamente contenuti. Queste piattaforme possono essere costituite da una base circolare fissata al soffitto da cui partono degli attuatori idraulici che sostengono la sedia per l'operatore. Dal momento che gli attuatori sono mantenuti in tensione e non vengono compressi, non si ha il problema di una loro possibile deformazione, ma risulta essere difficoltoso fissare una struttura così pesante al soffitto. Gli attuatori idraulici utilizzano olio ad alta pressione, la cui quantità è regolata da delle valvole, che, in caso di malfunzionamenti o guasti, fanno scendere gradualmente la sedia fino al pavimento, in modo da assicurare l'incolumità di chi la sta utilizzando.

Un altro tipo di piattaforma ha la base fissata al pavimento e richiede quindi una capacità di carico molto inferiore, permettendo l'utilizzo di attuatori meno potenti, e quindi meno costosi. Si possono ad esempio utilizzare degli attuatori pneumatici ad aria compressa, che vengono comandati da un'interfaccia centrale collegata in maniera seriale al computer che sta eseguendo la simulazione.

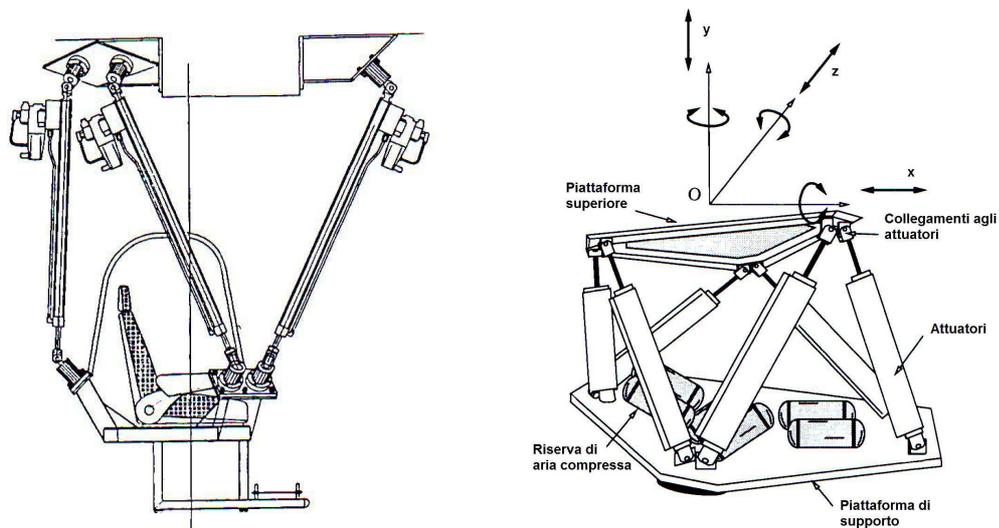


Figura 1.4: (a) Piattaforma idraulica dell'università del British Columbia (b) Piattaforma mobile PemRAM

Esoscheletri

A differenza delle altre interfacce prese in questione, gli esoscheletri sono delle braccia meccaniche che vengono indossate dall'operatore, permettendo di aumentare notevolmente la libertà di movimento e i gradi di libertà. Ciò si ripercuote ovviamente sulla complessità dei dispositivi e sui costi, che possono raggiungere le centinaia di migliaia di dollari. Questi dispositivi sono progettati per assomigliare il più possibile ad un braccio umano, ed hanno una parte che poggia sulla spalla con tre DoF (movimento in uno spazio tridimensionale), una parte in corrispondenza al gomito con un DoF (piegamento/estensione), e una parte in cui viene inserito il polso a tre DoF(piegamento/estensione, abduzione/adduzione e rotazione).

Per avere un movimento realistico anche della mano, e quindi poter afferrare degli oggetti, si rende necessario inserire delle giunture anche in corrispondenza di essa, aggiungendo quindi due DoF per il pollice (anteposizione/retroposizione e abduzione/adduzione) e uno per un altro dito (abduzione/retroposizione), raggiungendo un massimo di dieci DoF in totale. Le frequenze di lavoro e le coppie erogate non sono uguali per tutte le parti del dispositivo, infatti le parti terminali del braccio, come le dita o il polso, richiedono una banda più elevata (centinaia di Hz) per avere una rilevazione più precisa dei movimenti e una coppia più bassa (meno di 10 Nm) per non mettere a repentaglio l'operatore e perchè il peso da muovere è inferiore; mentre le parti più vicine alla base, come la spalla, richiedono bande inferiori (decine di Hz) e coppie più grandi (fino a 100 Nm) per muovere l'intera struttura che ha un'inerzia elevata.

Tutti i cavi e le tubature vengono inseriti all'interno dell'esoscheletro, in modo da limitare al massimo i pericoli di rottura, in particolare vi sono tre tipologie di tubature: una ad alta pressione (di erogazione), una a bassa pressione (di ritorno) e una di scolo per raccogliere le perdite di olio delle valvole presenti. Queste tubature sono collegate ad una pompa comandata da un interfaccia di controllo che regola il flusso negli attuatori e, quindi, i movimenti del braccio meccanico. Dal momento che questo è un sistema molto potente e che l'utente si trova molto vicino all'esoscheletro, la sua sicurezza diviene un aspetto fondamentale, infatti ogni controllore delle giunture monitora la differenza tra la posizione comandata

dall'operatore e quella effettiva della giuntura, spegnendo automaticamente il sistema nel caso in cui tale valore dovesse superare una soglia prefissata.

1.3 Dispositivi portatili

Il grande vantaggio dei dispositivi non portatili precedentemente descritti è che l'operatore non deve sostenere il peso degli attuatori, mentre lo svantaggio principale è che riducono notevolmente la sua libertà di movimento, con una conseguente riduzione di realismo della simulazione. Per tale motivo sono state create le interfacce portatili, cioè dei dispositivi aptici fissati al corpo umano (alla schiena, alle braccia, al polso o al busto) che hanno una maggior difficoltà progettuale a causa dei limiti di peso e volume imposti dalle ridotte capacità di carico del corpo umano. Di queste nuove tecnologie sempre in via di sviluppo i due esponenti principali sono gli esoscheletri per le braccia, chiamati anche sistemi a retroazione di forza esterna (EFF) e quelli per le mani, chiamati sistemi a retroazione di forza manuale (HFF), che si possono considerare l'uno il complementare dell'altro:

Il ruolo dei sistemi HFF è quello di replicare forze di media intensità sulle dita della mano come quelle registrate durante le comuni operazioni di manipolazione di oggetti di piccola-media grandezza. In altre situazioni (quando l'oggetto è pesante o vi sono forze di collisione di elevata intensità, oppure, al contrario, quando è richiesto che sia replicato un movimento quasi impercettibile) il sistema HFF può lavorare in combinazione con componenti complementari come il sistema EFF o i sistemi retroattivi tattili[6].

Quindi gli esoscheletri per le braccia sono in grado di replicare il peso di oggetti virtuali o collisioni con l'ambiente simulato, mentre quelli per le mani sono più indicati per le manipolazioni e le esplorazioni in ambienti virtuali. È importante puntualizzare che, per questi dispositivi, non è possibile affermare che la retroazione viene data da forze esterne come negli altri casi presi in considerazione, infatti vengono applicate sul braccio che sostiene il dispositivo, delle forze opposte a quelle che gli attuatori applicano all'operatore stesso, rendendo quindi nulla la forza complessiva applicata su di esso.

1.3.1 Esoscheletri per le braccia

Gli esoscheletri per le braccia misurano il movimento del braccio dell'utente e applicano le forze richieste dalla simulazione. Come già descritto negli esoscheletri vincolati, il braccio umano ha sette DoF, quindi, per poter simulare correttamente i suoi movimenti reali, tale interfaccia dovrà avere altrettanti gradi di libertà. Essi utilizzano motori a corrente continua che provvedono a dare la coppia necessaria a cinque giunti attraverso un sistema di trasmissione costituito da dei tendini; vi sono inoltre dei sensori di posizione e di coppia che misurano le differenze di tensione tra i cavi e i comandi dati dall'utente tramite un'impugnatura fissata all'estremità dell'ultimo collegamento rigido. Come anticipato, un problema di questi dispositivi è il peso, che però non può essere portato al disotto di un certo limite a causa del peso degli attuatori, rendendo quindi necessaria una compensazione della gravità per alleviare la fatica dell'operatore. Le coppie applicate dagli attuatori della spalla, del gomito e dell'avambraccio possono essere rappresentate da un vettore v , che, messo in relazione al vettore \mathbf{F} rappresentante la forza applicata all'impugnatura in una situazione di equilibrio statico dell'esoscheletro, è descritto dalla seguente equazione (valida per gran parte dei dispositivi robotici) [7]:

$$v = J^T(q)\mathbf{F} \quad (1.1)$$

Dove $J(q)$ è la matrice Jacobiana dell'esoscheletro che dipende dalla posizione q dei vari giunti. Per compensare la forza di gravità sarà quindi necessario aggiungere un valore proporzionale al suo effetto sulla struttura, rappresentato dal vettore \mathbf{G} . Si dovrà inoltre tenere conto degli attriti e della significativa inerzia dell'esoscheletro, ad esempio utilizzando un sensore di forza tridimensionale che misuri la differenza tra la retroazione di forza desiderata (\mathbf{F}_{des}) e quella applicata \mathbf{F} . L'equazione diviene quindi:

$$v = \mathbf{G} + J^T(q)(\mathbf{F}_{\text{des}} + \mathbf{K}(\mathbf{F}_{\text{des}} - \mathbf{F})) \quad (1.2)$$

Dove \mathbf{K} è una matrice 6x6 di guadagni costanti.

Nonostante in questa equazione non si tenga conto di forze che si oppongono

al movimento (come le forze di Coriolis e le forze centrifughe), si riesce comunque ad ottenere un ottimo controllo in retroazione e il controllore richiede una banda di qualche kHz che può essere ridotta notevolmente nelle situazioni in cui la compensazione della forza di gravità risulti essere meno critica.

Esistono diverse implementazioni di questi esoscheletri, ad esempio il GLAD-IN-ART, sviluppato in parte anche in Italia, l'EXOS, tecnicamente molto simile al precedente ma con costi decisamente più contenuti (\$78000) ed, infine, il dispositivo sviluppato presso l'università di Salford (Inghilterra) che verrà descritto nel dettaglio in seguito.

1.3.2 Esoscheletri per le mano

Questi esoscheletri applicano delle forze alla mano dell'operatore durante la simulazione di esplorazioni e manipolazioni, differendo da quelli non portatili per il fatto che sono fissati all'avambraccio o al palmo, e sono quindi interamente sostenuti dal braccio, imponendo dei forti limiti di peso. Per risolvere in parte questo problema e per il fatto che lo spazio a disposizione è ridotto, si cerca di posizionare gli attuatori lontano dalla mano, ad esempio sulle spalle o sulla schiena, trasmettendo il movimento tramite delle pulegge e dei cavi che hanno un peso molto inferiore. La mano è la parte del corpo con più gradi di libertà (20), quindi per avere una simulazione il più realistica possibile, sono necessari molti attuatori, provocando un accrescimento delle problematiche legato alla attuazione remota, che sono la forza di attrito e i giochi meccanici. Delle soluzioni innovative per eliminare i giochi meccanici sono di posizionare dei microattuatori in configurazione diretta sulla mano, che non richiedono trasmissioni ed, essendo molto leggeri, possono essere sostenuti senza fare troppa fatica.

Una prima implementazione è quella a corde, in cui gli attuatori vengono posizionati sul dorso della mano e un sistema di pulegge e corde trasmette la coppia alle dita permettendo la massima libertà di movimento e lasciando libero il palmo che può essere chiuso completamente; si inserisce quindi un encoder che misura gli spostamenti delle corde, permettendo di determinare i movimenti della mano e di calcolare la posizione relativa ad un valore iniziale fissato durante la calibratura del dispositivo. Un'interfaccia aptica di questo tipo permette ad

esempio di simulare la presa di oggetti virtuali rilevando inclinazioni delle giunture che possono raggiungere i 60° , corrispondenti all'incirca a tenere nella mano una sfera del raggio di 9 cm.

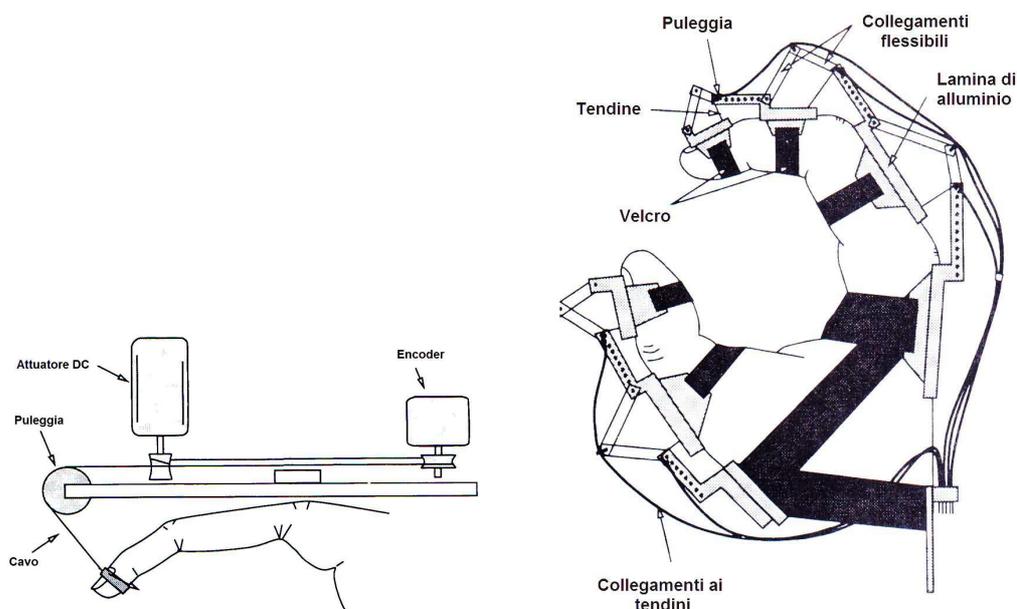


Figura 1.5: a) Schema hand master a corda. b) Schema hand master a corda con aste flessibili

In sistemi a corda più sofisticati si fissano delle parti di plastica e alluminio alle falangi delle dita, si collegano tra loro per formare l'esoscheletro con delle aste flessibili e si trasmette la coppia necessaria dagli attuatori tramite dei microcavi e delle pulegge. Per rilevare i movimenti dell'operatore si utilizzano quindi dei sensori di forza che misurano la tensione dei tendini da confrontare con i valori misurati da dei potenziometri fissati agli alberi dei motori.

Una seconda tipologia di esoscheletro è costituita da una guanto avente una serie di collegamenti meccanici in corrispondenza ad ogni giuntura di tre o più dita, che permettono una flessione delle dita fino a 90° e una adduzione/abduzione di 15° . Gli attuatori sono quindi fissati sulla parte del guanto corrispondente al dorso della mano e vengono comandati dal controllore per imprimere la forza adeguata a simulare l'oggetto o l'ambiente virtuale desiderato. In base al grado di realismo che si vuole ottenere e ovviamente al denaro che si è disposti a spendere si possono utilizzare interfacce che hanno da cinque (GLAD-IN-ART e SAFIRE

I) a sette (SAFIRE II) DoF e che possono raggiungere risoluzioni del decimo di grado. La più leggera e meno costosa implementazione di questa categoria è il guanto CyberForce che verrà trattato in seguito.

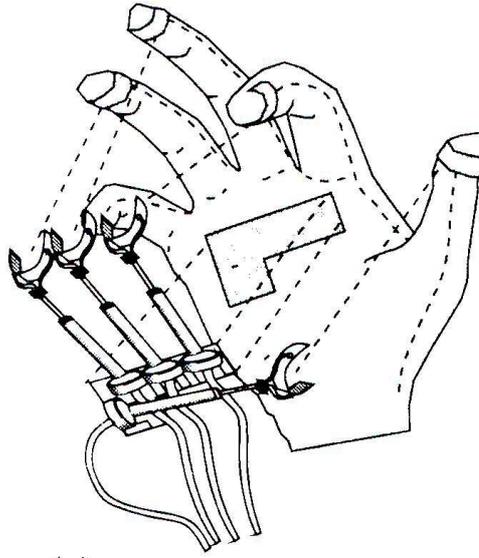


Figura 1.6: Guanto aptico portatile

La terza ed ultima tipologia elimina completamente l'utilizzo di cavi e pulegge per la trasmissione collegando direttamente degli attuatori cilindrici posizionati sul palmo della mano alle punte delle dita (Figura 6). Questi cilindri sono quindi collegati a delle giunture sferiche attraversate da dei tubicini che permettono il passaggio di aria compressa per muovere i pistoni all'interno degli attuatori e quindi le dita. Questa struttura permette la flessione e l'abduzione/adduzione delle dita, ma provoca una limitazione della libertà di movimento della mano, poiché ostruisce in parte il palmo e permette di piegare le dita al massimo di 40-50°; per assicurare l'incolumità dell'operatore in caso di guasti si rende inoltre necessario impedire l'estensione della mano oltre la posizione determinata nella fase di calibrazione. Il vantaggio principale di questo sistema è che si possono utilizzare attuatori molto leggeri che non richiedono altre trasmissioni facendo raggiungere un peso complessivo del master di 100g, ben inferiore al peso degli altri master per le mani, che raramente scendono sotto il chilo e mezzo.

1.4 Confronto tra le interfacce aptiche

In conclusione le differenze principali tra i dispositivi aptici portatili e quelli non portatili stanno nel fatto che, i primi danno una grande libertà di movimento ma dovendo essere sostenuti dall'operatore hanno dei grossi limiti di peso e volume, e quindi di prestazioni, mentre i secondi impediscono all'utente di muoversi liberamente, ma non danno alcun tipo di limite sulla struttura fisica del dispositivo, permettendo l'utilizzo di qualsiasi attuatore o componente meccanico a disposizione. Di seguito viene data una tabella riassuntiva presa dal testo di Burdea[1], in cui vengono inserite le tipologie di interfacce aptiche, i possibili gradi di libertà, dei valori indicativi delle coppie erogabili, lo spazio di lavoro e la larghezza di banda del controllore.

Tipo di interfaccia	DOF	Coppia/forza in uscita	Spazio di lavoro	Larghezza di banda
Dispositivi non portatili				
Interfacce aptiche fissate al tavolo				
Joystick sferico	2	20N	5-20 cm	50-200 Hz
Joystick cartesiano	3-6	10N	15x15cm	100 Hz
Joystick a levitazione magnetica	6	60N (picco)	1 cm	3000 Hz
Pen-based	3-6	5-10N (picco)	8x17x25 cm **	800 Hz
Master a corda	6-12	40N	40 cm di diametro	10-30 Hz
Guanti di percezione	10	-	Dipende dalla mano	6-8 Hz
Interfacce aptiche fissate al pavimento/soffitto				
Master universale tipo 1	4-6	10-20 N 0.5 N-m	30x30x30 cm***	40-50 Hz
Master universale tipo 2	6	-	40x40x20 cm	16 Hz
Braccia robotiche	6*	3 N	60x60x60 cm	4 Hz
Piattaforme di movimento	3-6	2000 N	100x100x100 cm	20-50 Hz
Esoscheletri	7-10	97 Nm spalla 50 Nm gomito 5.5 Nm mano	180° spalla 105° gomito 80° pollice	20-50 Hz
Dispositivi portatili				
Master per il braccio	5-7	20-40 Nm spalla 10-13 Nm gomito	120° spalla 130° gomito	30 Hz
Master per la mano a corda	2	7 N	-	-
Master per la mano con aste flessibili	12-15	10 Nm	-	-
Guanto aptico portatile	5-8	0.2 Nm	90° flessione 45° abduzione	30 Hz
Master per la mano a cilindri	4	4-16 N	40-90° flessione adduzione piena	11-15 Hz

Tabella 1.1: Confronto tra interfacce aptiche portatili e non portatili

* Possono aumentare se si aggiunge anche la retroazione alle dita della mano

** Valori relativi al PHANToM

*** Valori relativi al JPL

Capitolo 2

Controllo delle interfacce aptiche

2.1 Considerazioni preliminari

Le interfacce aptiche, come già anticipato, sono dei dispositivi master-slave, in cui l'operatore comanda direttamente un dispositivo (master) che trasmette i comandi ricevuti ad un altro dispositivo remoto (slave).

Dal punto di vista delle teleoperazioni, un sistema master-slave è composto da due sottosistemi: (1) il dispositivo master, che in genere è un meccanismo a più gradi di libertà costituito da una catena cinematica spesso simile al braccio umano; (2) il dispositivo slave, che è spesso isomorfo al master ed è in genere dotato di un end-effector[8].

Nel caso delle teleoperazioni sia il master che lo slave sono dei manipolatori fisici che interagiscono direttamente con l'operatore, mentre nel caso della simulazione con le realtà virtuali non esiste un manipolatore slave fisico, poiché il master invia le informazioni misurate ad un calcolatore senza interagire tramite uno slave con l'ambiente remoto.

Il controllo di questi dispositivi deve avere due requisiti fondamentali, la **stabilità** e la **trasparenza**. la prima rappresenta la capacità del sistema di portare il proprio valore di uscita ad un valore costante dopo un certo tempo, mentre la seconda può essere interpretata come l'accuratezza con cui rappresenta l'ambiente virtuale all'operatore e dipende dalla fedeltà con cui lo slave segue i movimenti e le forze del master. La distinzione tra i vari tipi di sistemi di controllo viene

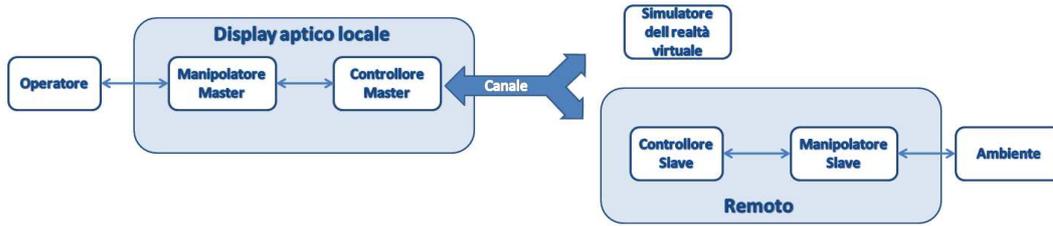


Figura 2.1: Schema a blocchi di un sistema di tipo master-slave

generalmente fatta in base al numero di segnali che il master e lo slave si trasmettono, in particolare con un sistema a quattro canali (in alcuni casi soltanto tre) è possibile ottenere una trasparenza perfetta, cioè non si è più in grado di distinguere il movimento del master da quello dell'oggetto reale[9, 10, 11]. In realtà le performance e la stabilità di questi sistemi dipendono fortemente dal modo in cui l'operatore utilizza il master, ma soprattutto dall'ambiente in cui viene utilizzato.

2.2 Stabilità e valutazione delle performance

Un modo per rappresentare il master, lo slave e il tra i due è quello rappresentato in figura 2, in cui vengono considerati come una unica rete a due porte in cui in ingresso si ha l'operatore, mentre in uscita si ha l'ambiente in cui lo slave è posizionato (in alcuni casi può trattarsi di un ambiente virtuale).

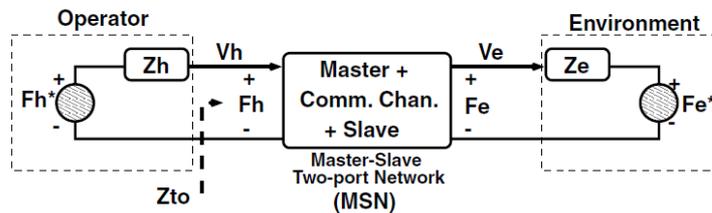


Figura 2.2: Diagramma di una rete di teleoperazioni

Studiando quindi la rete nel dominio delle trasformate di Laplace si ottengono le seguenti equazioni lineari:

$$F_h = F_h^* - Z_h V_h \quad (2.1)$$

$$F_l = F_l^* - Z_l V_l \quad (2.2)$$

Dove $Z_h, Z_l, V_h, V_l, F_h, F_l, F_h^*$ e F_l^* sono rispettivamente le impedenze e le velocità del master e dello slave, la forza applicata dall'operatore sul master e la forza che viene applicata dallo slave sull'ambiente esterno. Queste formule verranno utilizzate per l'analisi delle performance del controllo, mentre la stabilità non dipende dalla linearità dell'operatore e dell'ambiente. In base agli ingressi delle rete si possono quindi determinare le sue matrici, che sono di impedenza Z , di ammettenza Y e le ibride H e G [12, 13].

$$\mathcal{O}_Z = \begin{bmatrix} F_h \\ F_l \end{bmatrix} = Z \mathcal{I}_Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h \\ -V_l \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathcal{O}_Y = \begin{bmatrix} V_h \\ -V_l \end{bmatrix} = Y \mathcal{I}_Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h \\ F_l \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathcal{O}_H = \begin{bmatrix} F_h \\ -V_l \end{bmatrix} = H \mathcal{I}_H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h \\ F_l \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathcal{O}_G = \begin{bmatrix} V_h \\ F_l \end{bmatrix} = G \mathcal{I}_G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_h \\ -V_l \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Le rappresentazioni sopra elencate fanno parte della categoria delle immittenze, rappresentate dalla matrice di immettenza $\mathcal{P} = [p_{i,j}]$ $i,j = 1,2$, dove $\mathcal{O}_P^T \mathcal{I}_P = \mathcal{O}_Z^T \mathcal{I}_Z = \mathcal{O}_Y^T \mathcal{I}_Y = \mathcal{O}_H^T \mathcal{I}_H = \mathcal{O}_G^T \mathcal{I}_G = F_h V_h - F_l V_l$ è la potenza istantanea erogata alla porta. Per ottenere un sistema passivo e stabile è necessario che sia l'operatore che l'ambiente siano strettamente passivi[14, 15, 9]imponendo delle condizioni di conservazione, ma è comunque possibile ottenere una stabilità di tipo non conservativo imponendo delle condizioni di stabilità assoluta[13]assicurando la passività delle rete ad una porta ottenuta chiudendo qualsiasi operatore o ambiente passivo. La stabilità assoluta della rete a due porte è verificata se:

- p_{11} e p_{22} sono reali e positive;

- la disuguaglianza

$$\eta_{\mathcal{P}}(\omega) = -\frac{\mathcal{R}(p_{12}p_{21})}{|p_{12}p_{21}|} + 2\frac{\mathcal{R}(p_{11})\mathcal{R}(p_{22})}{|p_{12}p_{21}|} \geq 1 \quad (2.7)$$

dove $\eta_{\mathcal{P}}(\omega)$ è chiamato parametro di stabilità della rete.

Il fatto che $p_{11}e p_{22}$ siano positivi e reali determina la passività dello slave e del master quando non sono accoppiati, cioè quando $p_{12} = p_{21} = 0$, mentre la seconda condizione rappresenta gli effetti dell'accoppiamento. Da esse è possibile dedurre le **condizioni di Llewellyn** per la stabilità assoluta, infatti sono equivalenti alle seguenti:

- i parametri di immittenza $p_{11}e p_{22}$ non hanno poli nel semipiano positivo;
- qualsiasi polo di $p_{11}o p_{22}$ nell'asse immaginario sono semplici e hanno residuo positivo e reale;
- sono verificate le disuguaglianze

$$\mathcal{R}(p_{11}) \geq 0 \quad (2.8)$$

$$\eta_{\mathcal{P}}(\omega) = -\cos(\angle p_{12}p_{21}) + 2\frac{\mathcal{R}(p_{11})\mathcal{R}(p_{22})}{|p_{12}p_{21}|} \geq 1 \quad (2.9)$$

Il criterio di Llewellyn è valido per un qualsiasi membro della classe delle immittenze e il parametro di stabilità è indipendente dalla matrice di immittenza, ottenendo $\eta_{\mathcal{Y}} = \eta_{\mathcal{Z}} = \eta_{\mathcal{H}} = \eta_{\mathcal{G}}$ [12].

La stabilità assoluta dipende soltanto dai parametri della rete e non dalla linearità dell'operatore e dell'ambiente, anche se esistono delle particolari coppie operatore-ambiente che possono impedire alla rete di essere assolutamente stabile (almeno una delle condizioni sopraelencate non è rispettata) rendendola potenzialmente instabile (potrebbe essere comunque stabile)[12, 13].

Nel 1989 Hogan dimostrò che l'impedenza del braccio umano è facilmente adattabile e varia nel tempo, che la retroazione neurale e gli attuatori muscolari sono sistemi attivi e che la mano ha delle caratteristiche di passività, permettendo

quindi la modellazione dell'operatore come una forza applicata e una impedenza passiva[16]. Per quanto riguarda l'ambiente, esso è quasi sempre un sistema passivo che assorbe energia; inoltre, dal momento che il range relativo all'impedenza dell'operatore è più piccolo rispetto a quello dell'ambiente, la stabilità assoluta può includere anche le condizioni di stabilità conservativa.

Come detto, la seconda caratteristica essenziale del controllo è la trasparenza, che può esser descritta come l'uguaglianza tra l'impedenza dell'ambiente e dell'operatore, cioè $\mathcal{Z}_{to} = \frac{F_h}{V_h}|_{F_l^*=0} = \frac{F_l}{V_l}|_{F_l^*=0} = \mathcal{Z}_e$ [9]. È possibile rappresentare questa relazione utilizzando i parametri ibridi precedentemente descritti:

$$\mathcal{Z}_{to} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})\mathcal{Z}_e}{1 + h_{22}\mathcal{Z}_e} \quad (2.10)$$

Se i parametri ibridi non sono in funzione delle impedenze, è possibile ottenere la trasparenza perfetta se[17]:

$$h_{11} = h_{22} = 0 \quad (2.11)$$

$$h_{12} = -h_{21} = 1 \quad (2.12)$$

Si ha quindi che un sistema perfettamente trasparente è anche assolutamente stabile, infatti $\mathcal{R}(h_{11}) = 0$ e $\eta_{\mathcal{H}} = 1$, ma per ottenere una maggior stabilità è necessario compromettere la trasparenza perfetta. Inoltre, a causa della presenza di un ritardo di trasmissione, si ha un trade-off tra stabilità e prestazioni, che rende impossibile avere la perfetta trasparenza[18, 9, 19]. Per quantificare in maniera semplice la trasparenza è possibile esaminare \mathcal{Z}_{to} considerando lo slave in moto libero ($\mathcal{Z}_{to} = 0$) o bloccato ($\mathcal{Z}_{to} \rightarrow \infty$), ottenendo il range di valori assunti dall'impedenza trasmessa all'operatore :

$$\mathcal{Z}_{tomin} = \mathcal{Z}_{to}|_{\mathcal{Z}_e=0} = h_{11} \quad (2.13)$$

$$\mathcal{Z}_{tewidth} = \mathcal{Z}_{to}|_{\mathcal{Z}_e \rightarrow \infty} - \mathcal{Z}_{tomin} = \frac{-h_{12}h_{21}}{h_{22}} \quad (2.14)$$

Delle performance ottimali sono caratterizzate da $|\mathcal{Z}_{tomin}| \rightarrow 0$ e $|\mathcal{Z}_{tewidth}| \rightarrow \infty$.

2.3 Tipologie di controllo

Vi sono due distinte tipologie di controllo, quello ad impedenza e quello ad ammettenza. Il controllo ad impedenza venne introdotto da Hogan nel 1985 ed caratterizzato dal ricevere in ingresso un riferimento di posizione e dare in uscita un riferimento di forza: l'utente muove il dispositivo aptico che reagisce imprimendo una forza se viene incontrato un oggetto virtuale. L'operatore sente inevitabilmente la massa e l'attrito del dispositivo, ma il loro effetto può essere reso quasi trascurabile con un meccanismo ben progettato; inoltre questi sistemi sono caratterizzati per essere molto leggeri e per permettere di effettuare movimenti retrogradi. Il controllo in ammettenza è l'inverso di quello in impedenza, infatti l'utente imprime una forza al dispositivo che si muove di conseguenza. Questo controllo permette una grande libertà nella progettazione meccanica dal momento che i giochi e l'inerzia sul terminale possono essere eliminati, ottenendo dei meccanismi piuttosto robusti in grado di sostenere forze di elevata intensità.

Tenendo conto dei limiti imposti dalla robustezza del sistema e definendo un ciclo di controllo appropriato del dispositivo, è possibile cambiare il tipo di manipolatore da impedenza a ammettenza e viceversa secondo i seguenti modelli di slave e master:

$$Z_m V_h = F_h + F_{cm} \text{ master ad impedenza} \quad (2.15)$$

$$Z_s V_e = -F_e + F_{cs} \text{ slave ad impedenza} \quad (2.16)$$

$$Y_m F_h = V_h + V_{cm} \text{ master ad ammettenza} \quad (2.17)$$

$$Y_s V_e = -V_e + V_{cs} \text{ slave ad ammettenza} \quad (2.18)$$

Dove Z_m, Z_s, Y_m, Y_s e $F_{cm}, F_{cs}, V_{cm}, V_{cs}$ indicano le dinamiche del master e dello slave e gli ingressi del loro controllo. Possiamo quindi determinare quattro tipologie differenti di controllo dei sistemi di teleoperazione: impedenza-impedenza, impedenza-ammettenza, ammettenza-ammettenza e ammettenza-impedenza. In

figura 3 sono rappresentati i diagrammi a blocchi dei quattro sistemi controllati da un generico controllore a quattro canali, dove T_d rappresenta il ritardo introdotto dal canale di comunicazione, mentre i blocchi C e E sono le funzioni di trasferimento del compensatore. In tutti e quattro i controllori bilaterali ci sono generalmente due tipologie di segnali di controllo che vengono applicati agli attuatori dello slave e del master, il primo viene dal controllore definito localmente sul master e sullo slave ($C_5, C_6, C_m, C_s, E_5, E_6, E_m, E_s$), mentre l'altro deriva dall'azione in avanti ($C_1, \dots, C_4, E_1, \dots, E_4$). In base al tipo di manipolatore, quest'ultimo può essere sia un segnale di posizione che di forza, ad esempio un'azione in avanti effettuata su un dispositivo ad impedenza dovrà essere un segnale di forza, inoltre può essere sia una forza di contatto misurato nel luogo remoto (es.: $C_2 F_e$ o $C_3 F_h$) oppure il comando di forza ottenuto facendo passare la posizione misurata del dispositivo remoto attraverso un filtro ad impedenza (es.: $E_1^{-1} F_h$ o $E_4^{-1} F_e$).

Nella tabella 1 viene data una descrizione del sistema di blocchi descritto, considerando i parametri del controllo di forza (C_2, C_3, C_5, C_6) e di posizione (E_2, E_3, E_5, E_6) come valori scalari. Questa ipotesi permette di studiare in maniera analitica la stabilità del parametro η_P , infatti se questo parametro dipendesse dalla frequenza, allora bisognerebbe fare uno studio numerico al posto di una analisi qualitativa per esaminare i trade-off tra le performance e la stabilità. In seguito verrà fatta una analisi sui sistemi di tipo impedenza-impedenza, e si darà una tabella in cui sono presenti le relazioni equivalenti per le altre tre tipologie, tenendo conto del fatto che, per quanto riguarda la stabilità, non cambia se l'operatore e l'ambiente vengono modellati come sistemi passivi non lineari.

2.4 Controllo e ottimizzazione della trasparenza

Di seguito verrà considerato un controllo bilaterale a quattro canali di tipo impedenza-impedenza, derivando le condizioni di controllo per ottenere una trasparenza perfetta in un sistema ideale. Al termine di questo paragrafo verranno quindi estese le conclusioni raggiunte per gli altri tre sistemi.

Dopo aver applicato i comandi di controllo F_{cm} e F_{cs} al sistema di figura 3 (a), la dinamica del sistema in catena chiusa sono:

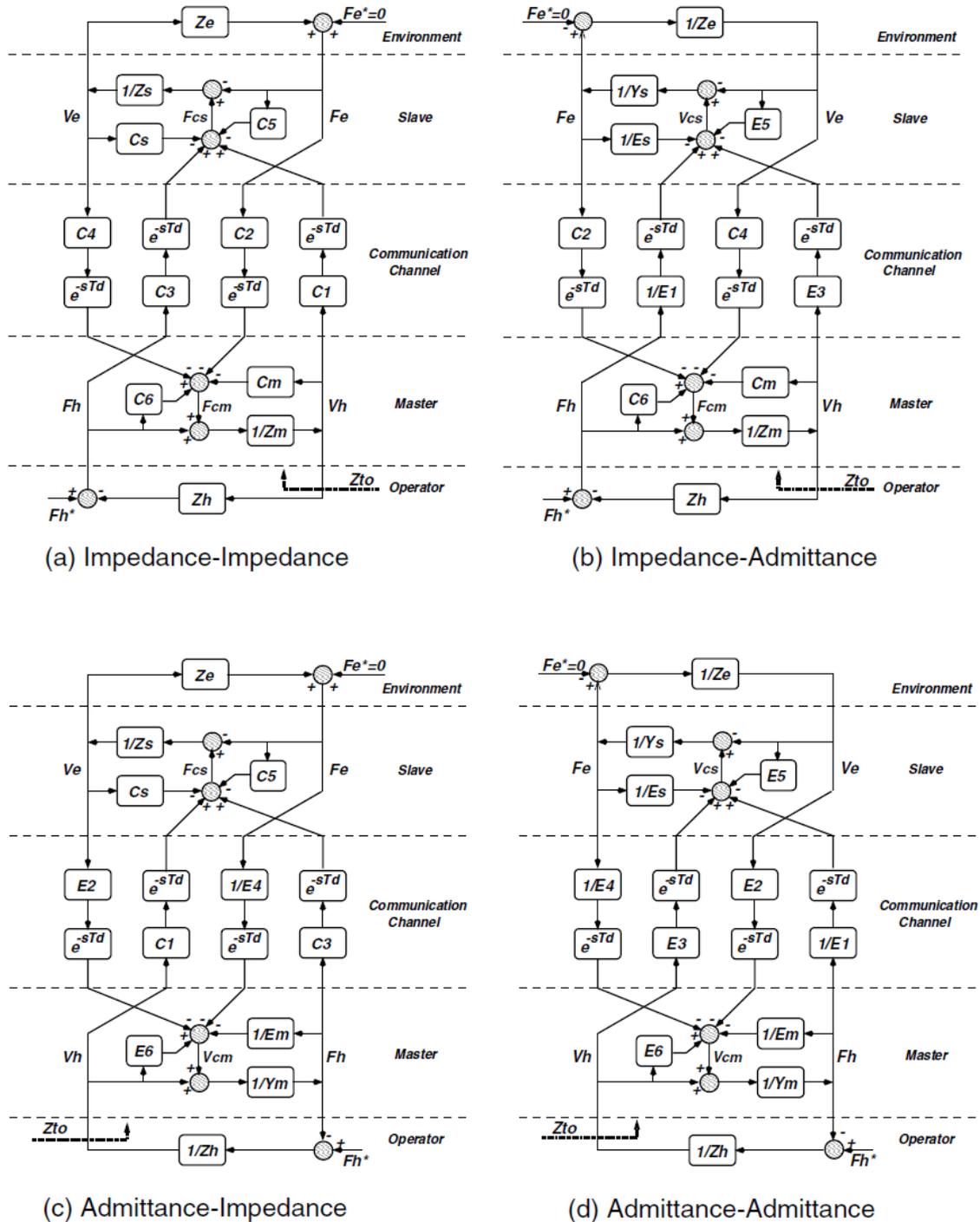


Figura 2.3: Diagramma a blocchi di quattro tipologie di sistemi di teleoperazione controllati da controlli bilaterali a quattro canali.

Blocco	Descrizione	Modello
Modello del master-slave ad impedenza		
Z_m	Impedenza del master	Massa, $M_m s$
Z_s	Impedenza dello slave	Massa, $M_s s$
C_m	Controllore locale di posizione del master	Molla-smorzatore, $B_m + \frac{K_m}{s}$
C_s	Controllore locale di posizione dello slave	Molla-smorzatore, $B_s + \frac{K_s}{s}$
C_1	Controllore feedforward di forza che comanda il master	Filtro ad impedenza
C_2	Controllore feedforward di forza dello slave	Guadagno scalare
C_3	Controllore feedforward di forza del master	Guadagno scalare
C_4	Controllore feedforward di forza che comanda lo slave	Filtro ad impedenza
C_5	Controllore locale di forza dello slave	Guadagno scalare
C_6	Controllore locale di forza del master	Guadagno scalare
Modello del master-slave ad ammettenza		
Y_m	Ammettenza del master	FDT dell'ammettenza
Y_s	Ammettenza dello slave	FDT dell'ammettenza
E_m	Controllore locale di forza del master	Filtro ad impedenza
E_s	Controllore locale di forza dello slave	Filtro ad impedenza
E_1	Controllore feedforward di posizione che comanda il master	Filtro ad impedenza
E_2	Controllore feedforward di posizione dello slave	Guadagno scalare
E_3	Controllore feedforward di posizione del master	Guadagno scalare
E_4	Controllore feedforward di posizione che comanda lo slave	Filtro ad impedenza
E_5	Controllore locale di posizione dello slave	Guadagno scalare
E_6	Controllore locale di posizione del master	Guadagno scalare
Operatore e ambiente		
Z_h	Impedenza dell'operatore	FDT dell'impedenza
Z_e	Impedenza dell'ambiente	FDT dell'impedenza
F_h^*	Forza di ingresso dell'operatore	-
F_e^*	Forza di ingresso dell'ambiente	0

Tabella 2.1: Nomenclatura e descrizione del modello di un generico sistema di controllo bilaterale di teleoperazione.

$$Z_{cm}V_h + C_4e^{-sT_d}V_e = (1 + C_6)F_h - C_2e^{-sT_d}F_e \quad (2.19)$$

$$Z_{cs}V_e + C_1e^{-sT_d}V_h = C_3e^{-sT_d}F_h - (1 + C_5)F_e \quad (2.20)$$

dove $Z_{cm} = Z_m + C_m$ e $Z_{cs} = Z_s + C_s$. Per analizzare la stabilità e le performance del sistema sono necessari i parametri ibridi, che si possono derivare dalle (5), (19) e (20):

$$h_{11} = \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1 + C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}} \quad (2.21)$$

$$h_{12} = \frac{C_2Z_{cs}e^{-sT_d} - C_4(1 + C_5)e^{-sT_d}}{(1 + C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}} \quad (2.22)$$

$$h_{21} = -\frac{C_3Z_{cm}e^{-sT_d} + C_1(1 + C_6)e^{-sT_d}}{(1 + C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}} \quad (2.23)$$

$$h_{22} = \frac{(1 + C_5)(1 + C_6) + C_2C_3e^{-2sT_d}}{(1 + C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}} \quad (2.24)$$

e utilizzando le (10) e (21-24) si può ottenere l'impedenza trasmessa dall'operatore:

$$Z_{to} = \frac{(Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}) + [(1 + C_5)Z_{cm} + C_1C_2e^{-2sT_d}]Z_e}{[(1 + C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sT_d}] + [(1 + C_5)(1 + C_6) + C_2C_3e^{-2sT_d}]Z_e} \quad (2.25)$$

Nel caso in cui il ritardo T_d fosse trascurabile, utilizzando:

$$\begin{cases} C_1 = Z_{cs} \\ C_2 = 1 + C_6 \\ C_3 = 1 + C_5 \\ C_4 = -Z_{cm} \end{cases} \quad (2.26)$$

e supponendo $(C_2, C_3) \neq (0, 0)$, conosciuta come **legge per l'ottimizzazione della trasparenza**, che soddisfa le (11) e (12) per assicurare una trasparenza

perfetta[9, 11]. L'interpretazione fisica di questo sistema è che, al fine di ottenere la trasparenza, le dinamiche del master e dello slave devono essere cancellate utilizzando delle dinamiche inverse e l'azione in avanti deve corrispondere alla forze della rete esercitate dall'operatore e dall'ambiente. In questo modo il master e lo slave sono effettivamente rimossi e l'operatore e l'ambiente sono virtualmente collegati. Dal momento che, nella realtà, i segnali di accelerazione non sono disponibili o sono troppo rumorosi, vengono trasmesse soltanto le posizioni e le velocità del master e dello slave, che sono $C_1 = C_s = B_s + \frac{K_s}{s}$ e $C_4 = -C_m = -(B_m + \frac{K_m}{s})$.

Come per la stabilità del controllore a quattro canali ottimizzato per la trasparenza, l'equazione caratteristica del sistema sotto le condizioni di idealità è:

$$\Delta_o = (C_2 Z_{cs} + C_3 Z_{cm})(Z_h + Z_e) = 0 \quad (2.27)$$

Ciò sta a significare che se C_2 e C_3 sono dei singoli guadagni e l'operatore e l'ambiente sono passivi, il sistema rimane stabile se $C_2 > -\min(\frac{M_m}{M_s}, \frac{B_m}{B_s}, \frac{K_m}{K_s})C_3$. In termini di robustezza della stabilità, anche se il sistema è stabile per $C_2, C_3 > 0$, dal momento che $h_{11} = h_{22} = 0$ e $h_{12} = -h_{21} = 1$, si ha che $\eta = 1$ e quindi una stabilità assoluta del sistema diviene marginale; inoltre la presenza del termine $C_2 Z_{cs} + C_3 Z_{cm}$ in h_{11} e h_{22} per $T_d \approx 0$, non vi potranno essere radici nel semipiano positivo da utilizzare nelle condizioni di Llewellyn.

In assenza di ritardi, l'analisi della stabilità e delle performance è semplice ed è ottenibile la trasparenza perfetta, mentre, se sono presenti ritardi significativi, sia la stabilità che la trasparenza vengono compromessi e la loro analisi diviene molto più complessa.

2.5 Analisi delle performance e della stabilità

I sistemi a quattro canali divengono decisamente più semplici se soltanto un segnale (forza o posizione) viene trasmesso tra master e slave, ottenendo quindi un architettura di controllo a due canali che può presentarsi in quattro modi differenti: forza-forza (FF), forza-posizione (FP), posizione-forza (PF) e posizione-posizione (PP). Di seguito verranno quindi discusse la stabilità e le prestazioni dei sistemi a due canali di tipo immettenza-immettenza, effettuando uno studio

Impedenza-Ammettenza	
paramatre ibridi della rete a due porte master-slave	$h_{11} = \frac{(1+E_5)Z_{cm}+E_3C_4e^{-2sT_d}}{(1+E_5)(1+C_6)-E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}}$ $h_{12} = \frac{C_2(1+E_5)e^{-sT_d}-C_4Y_{es}e^{-sT_d}}{(1+E_5)(1+C_6)-E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}}$ $h_{21} = -\frac{E_3(1+C_6)e^{-sT_d}+E_1^{-1}Z_{cm}e^{-sT_d}}{(1+E_5)(1+C_6)-E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}}$ $h_{22} = \frac{(1+C_6)Y_{es}+E_1^{-1}C_2e^{-2sT_d}}{(1+E_5)(1+C_6)-E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}}$
Impedenza trasmessa	$Z_{to} = \frac{[(1+E_5)Z_{cm}+E_3C_4e^{-2sT_d}]+[Z_{cm}Y_{es}+C_2E_3e^{-2sT_d}]Z_e}{[(1+E_5)(1+C_6)-E_1^{-1}C_4e^{-2sT_d}]+[(1+C_6)Y_{es}+E_1^{-1}C_2e^{-2sT_d}]Z_e}$
Legge per l'ottimizzazione della trasparenza	$E_1^{-1} = Y_{es}, C_2 = 1 + C_6, E_3 = 1 + E_5, C_4 = -Z_{cm}, (C_2, E_3) \neq (0, 0)$
Ammettenza-Impedenza	
paramatre ibridi della rete a due porte master-slave	$h_{11} = \frac{(1+E_6)Z_{cs}+E_2C_1e^{-2sT_d}}{Y_{em}Z_{cs}+E_2C_3e^{-2sT_d}}$ $h_{12} = \frac{E_4^{-1}Z_{cs}e^{-sT_d}+E_2(1+C_5)e^{-sT_d}}{Y_{em}Z_{cs}+E_2C_3e^{-2sT_d}}$ $h_{21} = -\frac{C_3(1+E_6)e^{-sT_d}+C_1Y_{em}e^{-sT_d}}{Y_{em}Z_{cs}+E_2C_3e^{-2sT_d}}$ $h_{22} = \frac{(1+C_5)Y_{em}+E_4^{-1}C_3e^{-2sT_d}}{Y_{em}Z_{cs}+E_2C_3e^{-2sT_d}}$
Impedenza trasmessa	$Z_{to} = \frac{[(1+E_6)Z_{cs}-C_1E_2e^{-2sT_d}]+[(1+C_5)(1+C_6)-C_1E_4^{-1}e^{-2sT_d}]Z_e}{[Y_{em}Z_{cs}+E_2C_3e^{-2sT_d}]+[(1+C_5)Y_{em}+E_4^{-1}C_3e^{-2sT_d}]Z_e}$
Legge per l'ottimizzazione della trasparenza	$C_1 = Y_{es}, E_2 = 1 + E_6, C_3 = 1 + C_5, E_4^{-1} = -Y_{em}, (E_2, C_3) \neq (0, 0)$
Ammettenza-Ammettenza	
paramatre ibridi della rete a due porte master-slave	$h_{11} = \frac{(1+E_5)(1+E_6)-E_2E_3e^{-2sT_d}}{(1+E_5)Y_{em}-E_1^{-1}E_2e^{-2sT_d}}$ $h_{12} = \frac{C_2(1+E_5)e^{-sT_d}-C_4Y_{es}e^{-sT_d}}{(1+E_5)Y_{em}-E_1^{-1}E_2e^{-2sT_d}}$ $h_{21} = -\frac{E_3(1+C_6)e^{-sT_d}+E_1^{-1}Z_{cm}e^{-sT_d}}{(1+E_5)Y_{em}-E_1^{-1}E_2e^{-2sT_d}}$ $h_{22} = \frac{(1+C_6)Y_{es}+E_1^{-1}C_2e^{-2sT_d}}{(1+E_5)Y_{em}-E_1^{-1}E_2e^{-2sT_d}}$
Impedenza trasmessa	$Z_{to} = \frac{[(1+E_5)(1+E_6)-E_2E_3e^{-2sT_d}]+[(1+E_6)Y_{es}+E_3E_4^{-1}e^{-2sT_d}]Z_e}{[(1+E_5)Y_{em}-E_1^{-1}E_2e^{-2sT_d}]+[Y_{em}Y_{es}+E_1^{-1}E_4^{-1}e^{-2sT_d}]Z_e}$
Legge per l'ottimizzazione della trasparenza	$E_1^{-1} = Y_{es}, E_2 = 1 + E_6, E_3 = 1 + E_5, E_4^{-1} = -Y_{em}, (E_2, E_3) \neq (0, 0)$

Tabella 2.2: Scheda riassuntiva sui tre sistemi non ancora trattati.

analitico che risulta essere decisamente semplificato anche in presenza di ritardi significativi.

Dalla dinamica dello slave a catena chiusa (20) si arriva a:

$$\frac{1}{Z_{cs}}F_e = -V_e + \frac{1}{Z_{cs}}(-C_5F_e + C_1e^{-sT_d}V_h + C_3e^{-sT_d}F_h) \quad (2.28)$$

e, comparandola con la (18) si ottiene $Y_s = \frac{1}{Z_{cs}}$ e $V_{cs} = \frac{1}{Z_{cs}}(-C_5F_e + C_1e^{-sT_d}V_h + C_3e^{-sT_d}F_h)$. Si nota che, se la Z_{cs} è piuttosto elevata, allora $\frac{1}{Z_{cs}}$ può essere rappresentata da una piccola ammettenza di un dispositivo facilmente controllabile da un controllore locale di posizione C_s , mentre la rappresentazione di un master/slave ad ammettenza tramite un sistema ad impedenza simile alla (28) non è possibile.

Per ottenere le equazioni di analisi della robustezza degli altri tre tipi di controllo è necessario effettuare le sostituzioni dei valori di C_1, \dots, C_6, Z_{cm} e Z_{cs} secondo le relazioni descritte nella tabella 2.3, notando che $Y_{em} = Y_m + E_m^{-1}$ e $Y_{es} = Y_s + E_s^{-1}$.

Di seguito, gli strumenti di valutazione delle performance e della stabilità introdotte nel paragrafo verranno utilizzati per analizzare i due sistemi di controllo a due canali più comuni, cioè PP e FP, estendendo successivamente i risultati ai casi FF e PF.

Architetture di controllo posizione-posizione

Posizione-posizione (PP) è la prima architettura di controllo bilaterale, venne implementata negli anni cinquanta e successivamente sviluppata e analizzata in [14, 15, 19]. I termini realitivi alla retroazione di forza sono nulli ($C_2 = C_3 = 0$) e si ottengono i seguenti parametri ibridi:

$$h_{11} = \frac{Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sT_d}}{(1 + C_6)Z_{cs}}, \quad h_{12} = \frac{-C_4(1 + C_5)e^{-sT_d}}{(1 + C_6)Z_{cs}}, \quad h_{21} = \frac{C_1e^{-sT_d}}{Z_{cs}}, \quad h_{22} = \frac{1 + C_5}{Z_{cs}} \quad (2.29)$$

Per studiare la robustezza della stabilità del sistema è quindi necessario sostituire tali parametri a quelli di immetenza della formula (9), ma risulta difficile studiarlo analiticamente utilizzando la rappresentazione ibrida, poichè il

parametro h_{11} è dato dalla somma di due termini, di cui uno è il ritardo. Dal momento che i parametri che rappresentano la stabilità sono indipendenti dal tipo di matrice della rete utilizzata ($\eta_{\mathcal{Z}} = \eta_{\mathcal{H}}$), è possibile utilizzare i parametri di impedenza, che non dipendono direttamente da h_{11} :

$$z_{11} = \frac{\Delta h}{h_{22}} = \frac{Z_{cm}}{(1+C_6)}, \quad z_{12} = \frac{h_{12}}{h_{22}} = \frac{-C_4 e^{-sT_d}}{(1+C_6)}, \quad z_{21} = \frac{-h_{12}}{h_{22}} = \frac{C_1 e^{-sT_d}}{(1+C_5)}, \quad z_{22} = \frac{1}{h_{22}} = \frac{Z_{cs}}{(1+C_5)} \quad (2.30)$$

Per quanto riguarda la seconda condizione di assoluta stabilità, la passività del master e dello slave disaccoppiati (z_{11}, z_{22}) è assicurata dal fatto che Z_{cm} e Z_{cs} sono passivi, mentre per la terza condizione è possibile sostituire i parametri elencati nella (9), ottenendo:

$$\eta_{pp}(\omega) = \eta_{pp1}(\omega) + \eta_{pp2}(\omega) = -\cos\left(\angle \frac{-C_1 C_4 e^{-i2\omega T_d}}{(1+C_5)(1+C_6)}\right) + 2 \frac{\mathcal{R}\left(\frac{Z_{cm}}{1+C_6}\right)\mathcal{R}\left(\frac{Z_{cs}}{1+C_5}\right)}{\left|\frac{C_1 C_4 e^{-i2\omega T_d}}{(1+C_5)(1+C_6)}\right|} \quad (2.31)$$

$$= \operatorname{sgn}((1+C_5)(1+C_6)) \left[-\cos\left(\angle -C_1 C_4 e^{-j2\omega T_d}\right) + 2 \frac{\mathcal{R}(Z_{cm})\mathcal{R}(Z_{cs})}{|C_1 C_4|} \right] \quad (2.32)$$

poichè $|e^{-i2\omega T_d}| = 1$, $\eta_{pp2}(\omega)$ è indipendente dal ritardo. Si ha quindi che l'effetto del ritardo è presente soltanto nel termine η_{pp1} e, dal momento che esso appartiene all'intervallo $[-1,1]$ e che contiene il termine $e^{-i2\omega T_d}$, la stabilità asintotica potrà essere assicurata soltanto se $\eta_{pp2} \geq 2$, cioè $\operatorname{sgn}((1+C_5)(1+C_6))|C_1 C_4| \leq \mathcal{R}(Z_{cm})\mathcal{R}(Z_{cs})$. Ciò sta a significare che la quantità di smorzamento nel master e nello slave deve essere minima, ma per diminuire lo smorzamento sul master [slave] è necessario aumentare quella sullo slave [master], mantenendo quindi il valore complessivo costante; inoltre uno smorzamento più elevato abbinato ad una diminuzione dell'azione in avanti permette di migliorare la stabilità assoluta del sistema.

Tuttavia, dal momento che $\mathcal{R}(Z_{cm})\mathcal{R}(Z_{cs})$ non dipendono dalla frequenza, mentre $|C_1 C_4|$ sì, la condizione ottenuta è implementabile soltanto per alcuni intervalli di frequenza, pertanto η_{pp} non potrà essere ≥ 1 per tutte le frequenze.

L'effetto della retroazione locale di posizione sulla robustezza è più significativo rispetto alla retroazione locale di forza, poichè il master e lo slave inviano segnali di posizione, che sono intuitivamente controllati meglio da controllori di

posizione.

Per studiare le performance, (13) e (14) sono utilizzate per ottenere:

$$\begin{aligned} Z_{tomin} &= \frac{Z_{cm}}{1+C_6} - Z_{tewidth} \\ Z_{tewidth} &= \frac{-C_1 C_4 e^{-2sT_d}}{(1+C_6)Z_{cs}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Si ha quindi che l'attenuazione dei parametri C_1 e C_4 per migliorare la robustezza della stabilità ha un effetto negativo sulle performance, poichè provoca una diminuzione di $Z_{tewidth}$, rendendo necessario trovare un compromesso tra stabilità e performance in termini di parametri dell'azione in avanti. Anche altri fattori influenzano il comportamento del sistema, infatti l'aumento del parametro di retroazione locale di forza (C_6) ha un effetto negativo sulle performance riducendo sia Z_{tomin} che $Z_{tewidth}$, mentre una riduzione dei parametri di retroazione di locale di posizione (C_m , C_s) provoca un miglioramento nelle prestazioni e nella trasparenza a costo di un degrado della robustezza della stabilità assoluta.

Supponendo ora che sia verificata la legge di ottimizzazione della trasparenza (26) e considerando in particolare $C_1 = Z_{cs}$ e $C_4 = -Z_{cm}$ la (32) si semplifica ulteriormente, ottenendo:

$$\eta_{pp}(\omega) = \text{sgn}((1+C_5)(1+C_6))[-\cos(\angle -Z_{cm}Z_{cs}e^{-j2\omega T_d})] + 2\cos(\angle Z_{cm})\cos(\angle Z_{cs}) \quad (2.34)$$

In questo caso non è né una funzione dell'azione in avanti né una funzione del termine di smorzamento $\mathcal{R}(Z_{cm})\mathcal{R}(Z_{cs})$ della stabilità, quindi l'unico modo per migliorare un pò la robustezza è tramite i termini $\cos(\angle Z_{cm})$ e $\cos(\angle Z_{cs})$, incrementando la relativa quantità di smorzamento nelle dinamiche dello slave e del master.

Se il ritardo è trascurabile, utilizzando i parametri ibridi, si ottiene $\eta_{pp} = \text{sgn}(\frac{1}{(1+C_5)(1+C_6)})\cos(\angle Z_{cm}Z_{cs}) \leq 1$, per ogni $\omega \geq 0$ and $Z_{tomin} \rightarrow 0$, che comporta delle buone performance quando si lavora con oggetti morbidi o in moto libero e assume il suo valore massimo ad una frequenza ω_0 , che può essere ottenuto da $\frac{B_m}{B_s} = \frac{M_m\omega_0 - \frac{K_m}{\omega_0}}{M_s\omega_0 - \frac{K_s}{\omega_0}}$. In questo caso il parametro di stabilità si appiattisce a uno per tutte le frequenze e si ha stabilità assoluta (marginale) soltanto se $\frac{M_m}{M_s} = \frac{B_m}{B_s} =$

$\frac{K_m}{K_s}$, che può essere ottenuto tramite una adeguata selezione dei parametri del controllo locale.

Architetture di controllo forza-posizione

L'architettura di controllo forza-posizione (FP), conosciuta anche come retroazione di forza, venne sviluppata in numerose ricerche[20, 9]. In questo sistema l'azione in avanti di forza dal master e dallo slave vengono eliminati ($C_3 = C_4 = 0$) e si ottengono i parametri ibirdi:

$$h_{11} = \frac{Z_{cm}}{1+C_6}, h_{12} = \frac{C_2 e^{-sT_d}}{1+C_6}, h_{21} = \frac{-C_1 e^{-sT_d}}{Z_{cs}}, h_{22} = \frac{1+C_5}{Z_{cs}} \quad (2.35)$$

mentre il parametro di stabilità diviene:

$$\eta_{fp}(\omega) = \eta_{fp1}(\omega) + \eta_{fp2}(\omega) = -\cos\left(\angle \frac{C_1 C_2 e^{-i2\omega T_d}}{Z_{cs}(1+C_6)}\right) + 2 \frac{\mathcal{R}\left(\frac{Z_{cm}}{1+C_6}\right)\mathcal{R}\left(\frac{1+C_5}{Z_{cs}}\right)}{\left|\frac{-C_1 C_2 e^{-i2\omega T_d}}{Z_{cs}(1+C_6)}\right|} \quad (2.36)$$

$$= \text{sgn}(1+C_6) \left[-\cos\left(\angle \frac{C_1 C_2 e^{-j2\omega T_d}}{Z_{cs}}\right) + 2 \frac{\mathcal{R}(Z_{cm})(1+C_5)}{|C_1 C_2|} \cos\left(\angle \frac{1}{Z_{cs}}\right) \right] \quad (2.37)$$

dove $\cos(\angle \frac{1}{Z}) = \cos(\angle Z)$. Come per l'architettura PP, le condizioni di stabilità assoluta sono verificate solo in alcuni intervalli di frequenza dove $\eta_{fp} \geq 2$, cioè $(1+C_5)\mathcal{R}(Z_{cm}) \geq (1+C_6)|C_1 C_2|$. Ciò significa che, per migliorare la robustezza della stabilità, la saturazione del master e la retroazione locale di forza dello slave devono essere amplificati [20, 18], mentre l'azione in avanti di forza deve essere attenuata. Ciò suggerisce che, in termini di robustezza della stabilità, l'architettura FP è indicata per sistemi di teleoperazioni del tipo ammettenza-impedenza e, per garantire una stabilità assoluta per bande più larghe, sarà necessario avere un filtro passa basso come parametro dell'azione in avanti, poichè ad alte frequenze $\cos(\angle \frac{1}{Z_{cs}}) = \cos(\angle Z_{cs}) \rightarrow 0$, portando anche η_{fp} a convergere a zero. In questo caso, (37) non è più valido e (36) deve essere utilizzata al suo posto.

L'effetto della retroazione locale di forza del master e della retroazione locale di posizione dello slave è meno significativo sulla stabilità assoluta rispetto alla retroazione locale di posizione del master e di forza dello slave, poichè il master e lo slave trasmettono rispettivamente ed esclusivamente posizione e forza. Infine,

lo smorzamento del master ha un effetto decisamente maggiore sulla stabilità rispetto a quello dello slave.

Utilizzando i parametri ibridi nella (35), \mathcal{Z}_{tomin} e $\mathcal{Z}_{tewidth}$ divengono:

$$\begin{aligned}\mathcal{Z}_{tomin} &= \frac{Z_{cm}}{1+C_6} \\ \mathcal{Z}_{tewidth} &= \frac{C_1 C_2 e^{-2sT_d}}{(1+C_5)(1+C_6)}\end{aligned}\quad (2.38)$$

Si può notare che aumentando i parametri dell'azione in avanti (C_1 e C_2), si ottiene un allargamento della banda di trasparenza, mentre facendo lo stesso sui parametri della retroazione locale di forza (C_5 e C_6) si ha una diminuzione di \mathcal{Z}_{tomin} e $\mathcal{Z}_{tewidth}$.

Utilizzando quindi la legge di controllo (26) per ottenere l'architettura FP (i.e., $C_1 = Z_{cs}$ e $C_2 = 1 + C_6$) [9], allora η_{fp} viene ulteriormente semplificata:

$$\eta_{fp}(\omega) = \cos(\angle e^{-j2\omega T_d}) + 2 \frac{(1+C_5)}{(1+C_6)} \mathcal{R}(Z_{cm}) \mathcal{R}\left(\frac{1}{Z_{cs}}\right) \quad (2.39)$$

Confrontando la (37) con la (39), si può notare che il parametro di stabilità è divenuto significativamente dipendente anche dalle retroazioni locali di forza del master e di posizione dello slave. Ad esempio, una aumento dello smorzamento dello slave provoca una forte diminuzione di $\mathcal{R}\left(\frac{1}{Z_{cs}}\right)$ e una conseguente destabilizzazione il sistema. Per garantire la stabilità per tutti gli operatori e gli ambienti passivi, è necessario che $\frac{(1+C_5)}{(1+C_6)} \mathcal{R}(Z_{cm}) \mathcal{R}\left(\frac{1}{Z_{cs}}\right) \geq 1$, ma questa condizione sarà implementabile soltanto a medie frequenze per la presenza di $\mathcal{R}\left(\frac{1}{Z_{cs}}\right)$, che scompare alle basse ed alte frequenze.

Se il ritardo è trascurabile, allora il sistema sarà assolutamente stabile per ogni $\omega \geq 0$, infatti è sempre verificata la condizione $\eta_{fp} \geq 1$. Infine, per quanto riguarda le performance non è possibile avere uno \mathcal{Z}_{tomin} nullo e uno $\mathcal{Z}_{tewidth}$ infinitamente grande come osservato nel caso PP.

Architetture di controllo a quattro canali

In questo caso lo slave e il master inviano sia misure di posizione che di forza, pertanto sia la retroazione locale di posizione sia quella di forza divengono fattori

essenziali per quanto riguarda la stabilità e le performance. In generale, però, in base al tipo di ambiente in questione, si ha che soltanto un tipo di controllo viene influenzato significativamente:

- quando si opera in ambienti rigidi la forza di contatto diviene il segnale predominante e si deve quindi amplificare la retroazione locale di forza e attenuare quella di posizione;
- quando si opera in ambienti morbidi la posizione e la velocità divengono i segnali predominanti e si deve quindi attenuare la retroazione locale di forza e amplificare quella di posizione.

Si ha quindi che la differenza principale con i sistemi a due canali sta nell'effetto che hanno i parametri sulle performance e la robustezza della stabilità, infatti nelle architetture a quattro canali è possibile migliorare molto le prestazioni con una impedenza trasmessa all'operatore dotata del più basso minimo e della banda più larga, provocando però un degradamento della stabilità decisamente elevato.

2.6 Discussione e conclusioni

Confrontando i parametri di stabilità in (32),(37) e le misure delle performance in (33),(38), è possibile trarre le seguenti conclusioni per le architetture di controllo a due canali (i risultati ottenuti sono estendibili anche per le architetture FF e PF):

- la robustezza della stabilità aumenta se vengono diminuiti i parametri dell'azione in avanti, provocando però una perdita nel range della dinamica e un aumento della minima impedenza trasmessa, che implica un certo trade-off tra performance e stabilità;
- a prescindere dai parametri dell'azione in avanti, se i segnali di forza/posizione misurati vengono inviati al dispositivo remoto, la retroazione locale di forza/velocità dalla parte del trasmettitore ha una influenza maggiore sulla stabilità assoluta del sistema rispetto a quella della retroazione di posizione/forza;

- un incremento della retroazione locale di forza attenua sia Z_{tomin} che $Z_{towidth}$, inoltre un aumento dei parametri di retroazione locale di posizione fa aumentare anche Z_{tomin} .

Basandosi sulla stabilità, la tabella 3 descrive quali sono le migliori architetture di controllo per un particolare tipo sistema di teleoperazione, indicando anche quali sono i parametri che hanno un effetto importante sulla robustezza della stabilità del sistema per quel particolare tipo di architettura. Infine l'ultima colonna indica quali sono i parametri da modificare per regolare le performance senza influire molto sulla robustezza della stabilità; ad esempio, per una architettura PP, i parametri di retroazione locale di posizione del master e dello slave sono più influenti degli altri, ed è possibile modificare i parametri del controllo locale di forza per migliorare le performance del sistema senza intaccare la sua stabilità assoluta.

È importante tenere conto del fatto che, nella (34) e (39), le considerazioni fatte non sono più valide se i parametri dell'azione in avanti sono in funzione delle dinamiche del master e dello slave o dei loro parametri di retroazione locale: ad esempio, utilizzando la legge di trasparenza ottimizzata (26) in architettura a due canali differenti, i parametri di stabilità vengono modificati, quindi l'effetto delle retroazioni locali di forza e posizione sulla robustezza della stabilità cambia drasticamente [21].

Hardware Master-Slave	Architettura raccomandata	Retroazione locale	
		Stabilità	Performance
Ammettenza-Ammettenza	Posizione-Posizione	Posizione Master	Forza Master
		Posizione Slave	Forza Slave
Ammettenza-Impedenza	Forza-Posizione	Posizione Master	Forza Master
		Forza Slave	Posizione Slave
Impedenza-Ammettenza	Posizione-Forza	Forza Master	Posizione Master
		Posizione Slave	Forza Slave
Impedenza-Impedenza	Forza-Forza	Forza Master	Posizione Master
		Forza Slave	Posizione Slave

Tabella 2.3: Linee guida per la scelta dell'architettura di controllo per particolare tipi di sistemi di teleoperazione.

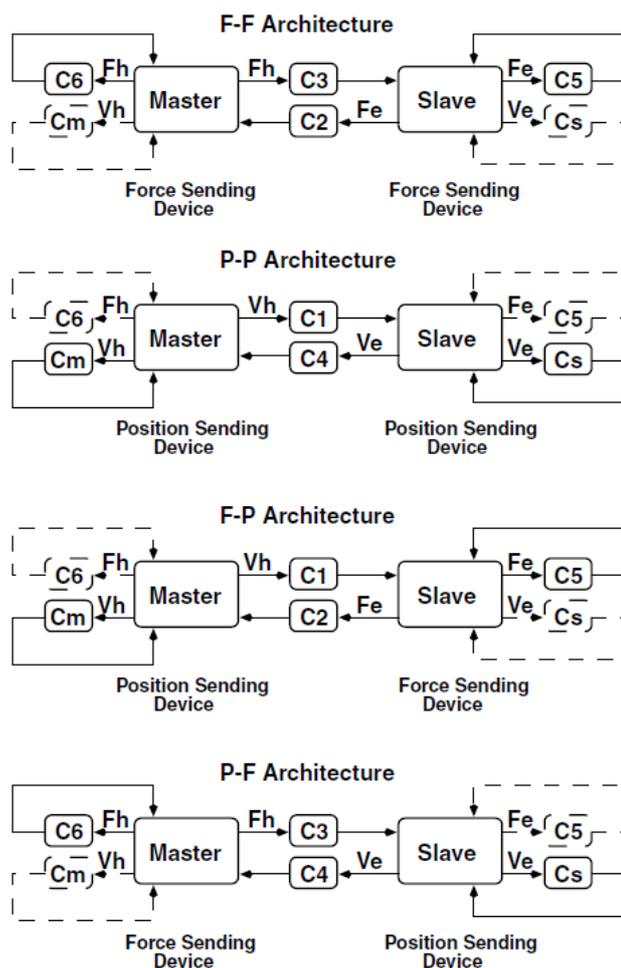


Figura 2.4: Diagramma a blocchi delle architetture di controllo a due canali. I collegamenti più significativi per le performance sono in linea continua, mentre i meno significativi in linea tratteggiata.

Capitolo 3

Attuazione dei dispositivi

Le interfacce aptiche utilizzano degli attuatori per retroazionare la sensazione di forza o tattile all'operatore, senza di essi sarebbe possibile soltanto misurare gli spostamenti fatti dall'utente e inviare tali informazioni al calcolatore. Gli attuatori possono essere confrontati tra loro in base alla loro funzionalità, al controllo e in particolare alle loro performance, cioè la massima forza (o coppia) erogabile, la massima forza (o coppia) applicabile con continuità senza surriscaldamenti, il consumo di potenza, la larghezza di banda e altri fattori di interesse della particolare interfaccia aptica in cui vengono utilizzati (ie. il peso per i dispositivi portatili). Dal momento che questi attuatori si trovano ad interagire con l'operatore è necessario che vi sia la massima trasparenza possibile, quindi non vi devono essere delle forze applicate ad esso quando non vi sono interazioni con l'ambiente e si deve seguire il movimento della mano velocemente senza opporsi ad essa.

Infine, dal momento che essi sono spesso vicini a chi utilizza l'interfaccia aptica, non possono essere presenti fluidi ad alte pressioni, tensioni e correnti elevate o qualsiasi altro fattore che possa mettere a rischio la sua incolumità. Di seguito vengono quindi descritti brevemente i principali sistemi di attuazione utilizzati nelle interfacce aptiche [1].

3.1 Attuatori elettrici

3.1.1 Motori DC

La maggior parte delle interfacce aptiche fa uso dei motori elettrici in corrente continua (DC), che sono semplici da installare, non sporcano, sono silenziosi e facili da controllare. Di seguito vengono descritti le due principali implementazioni di questa tipologia di motori, quelli a spazzola e i brushless.

Motori DC a spazzole

Il motore in corrente continua a spazzole ha una parte che gira detta appunto rotore o anche armatura e una parte che genera un campo magnetico fisso detta statore. Un interruttore rotante detto commutatore (o collettore a spazzole) inverte due volte ad ogni giro la direzione della corrente elettrica che percorre i due avvolgimenti generando un campo magnetico che entra ed esce dall'armatura e creando forze di attrazione e repulsione con i magneti permanenti fissi. La velocità di rotazione dipende dalla tensione applicata, dalla corrente assorbita dal rotore e dal carico applicato. La coppia generata è proporzionale alla corrente ed il controllo più semplice agisce sulla tensione d'alimentazione, mentre nei sistemi più complessi si usa un controllo automatico in retroazione che legge le variabili per generare la tensione da applicare al motore.

Il suo limite principale sta nella necessità delle spazzole, che pongono un limite alla massima velocità di rotazione: maggiore è la velocità e più forte è la pressione che bisogna esercitare su di esse per mantenere un buon contatto. Tra spazzole e collettore, nei momenti di commutazione, si hanno transitori di apertura degli avvolgimenti induttivi e quindi delle scintille, che comportano disturbi elettrici sia irradiati nell'ambiente circostante che trasmessi al generatore di tensione (che alimenta il motore); questi disturbi, in determinati settori di impiego, possono causare problemi di sicurezza, in particolare in presenza di materiali infiammabili.

Motori DC brushless

Il motore brushless è un motore elettrico a magneti permanenti che, a differenza di un motore a spazzole, non ha bisogno di contatti elettrici striscianti sull'albero motore per funzionare. La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti, infatti, non avviene più per via meccanica, ma elettronicamente tramite un banco di transistor di potenza comandati da un microcontrollore collegato a un sensore a effetto Hall, che permette di conoscere la posizione del rotore rispetto allo statore. Ciò comporta una minore resistenza meccanica, elimina la possibilità che si formino scintille al crescere della velocità di rotazione, e riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica.

3.1.2 Freni a particelle magnetiche

Questo particolare tipo di attuatore si differenzia dagli altri per il fatto che assorbe o dissipa la potenza generata dall'utente [22]. È costituito da un'asta, da un disco e da una bobina toroidale situati all'interno di un contenitore pieno di piccole particelle metalliche, che si orientano secondo il campo magnetico generato dalla bobina. Queste particelle tendono ad attaccarsi al disco e alle pareti, creando una resistenza alla rotazione che aumenta all'aumentare della corrente nei cavi e permettendo quindi di ottenere un effetto frenante che può essere utilizzato ad esempio per simulare il contatto con superfici rigide. Il problema principale di questi dispositivi è che, anche quando viene tolta la corrente, le particelle mantengono un certo allineamento e continuano ad applicare una forza resistiva anche quando l'operatore si sposta dall'oggetto rigido. Una delle soluzioni a questo problema è imprimere una corrente inversa alla bobina, in modo tale da liberare le particelle. Matsuoka e Miller utilizzarono questo particolare tipo di attuatore per sviluppare un'interfaccia aptica passiva a sei DoF, che poteva essere utilizzato in campo medico per pazienti sui quali non era possibile applicare forze di grande intensità.

3.2 Attuatori idraulici

Gli attuatori idraulici sono utili nelle interfacce aptiche perchè permettono di utilizzare una banda decisamente grande, sfruttando le caratteristiche di incompressibilità del fluido (olio) che utilizzano per trasmettere energia. Altre caratteristiche importanti sono la grande velocità di risposta, i bassi attriti (dovuti all'utilizzo dell'olio che lubrifica) e le grandi forze e coppie che sono in grado di generare, ma anche il peso e il costo elevati dovuti alla necessità di un sistema idraulico piuttosto complesso. Questo sistema è costituito da quattro parti fondamentali: la cisterna, che contiene dell'olio pulito e a bassa pressione (di ritorno), la pompa idraulica, che crea e mantiene un flusso costante di olio, le valvole, che si occupano di mantenere il giusto flusso di olio del sistema nel caso di transitori di pressione, ed infine gli attuatori, che generano una coppia o una forza in uscita.

Questi ultimi sono costituiti da un pistone che viene messo in moto dall'olio ad alta pressione fatto scorrere nel cilindro che lo contiene, ed è possibile dare uno o due versi di funzionamento in base al fatto che nel cilindro sia possibile inserire il fluido da una (azione singola) o entrambe le estremità (azione doppia).

Un'interfaccia aptica che utilizza questa tipologia di attuatori è il SARCOS Dextrous Arm Master, un master per le braccia a sei DoF sviluppato dalla SARCOS Co. per applicazioni sottomarine.

3.3 Attuatori pneumatici

Gli attuatori pneumatici utilizzano l'aria compressa per trasferire l'energia dal generatore all'interfaccia aptica. Sono caratterizzati dalla presenza di attriti consistenti e dal fatto che hanno una coppia in uscita e una larghezza di banda minori rispetto a quelli idraulici, ma sono decisamente più leggeri, non usano materiali infiammabili, sono meno costosi e, dal momento che non sporcano, possono essere utilizzati in ambienti puliti (ie.: ospedali).

Essi utilizzano un sistema pneumatico costituito da un compressore che pressurizza l'aria da immettere nei pistoni, da un serbatoio utilizzato per tamponare le eventuali variazioni di flusso dell'aria, da un regolatore di pressione che si occu-

pa di mantenere la pressione desiderata anche quando viene applicato un carico, da delle valvole di controllo che regolano la pressione nei pistoni e gli attuatori che generano la coppia o la forza in uscita.

Questi ultimi possono essere di vario tipo, ad esempio quelli lineari, costituiti da un pistone messo in movimento in una o due direzioni variando rispettivamente la pressione da una o entrambe le estremità del cilindro che lo contiene, oppure i Micro Bellow, costituiti da una piccola struttura gonfiabile che può essere incorporata a dei guanti e permettono di imprimere una leggera pressione ($0.9-2.1\text{kg/cm}^2$) sulle dita dell'utente per dargli una sensazione tattile. Un dispositivo aptico che fa uso di questi attuatori è il Pneu-WREX [23], cioè un supporto per le braccia sviluppato per i bambini con debolezza degli arti.

3.4 Nuove tipologie di attuatori

3.4.1 Attuatori piezoelettrici

Gli attuatori piezoelettrici sono dei motori a rotazione estremamente leggeri e compatti sviluppati nel 1990 da Schadebrodt e Salomon in Germania. Sono costituiti da uno statore iscoideale premuto contro un disco laminato che funge da statore, composto da degli elementi elastici piezoelettrici che vibrano quando vengono messi in risonanza. Queste oscillazioni ad alta frequenza provocano un piccolissimo slittamento della superficie a contatto con lo statore, ottenendo quindi un motore con comportamenti simili a quelli DC, cioè una alta coppia di stallo e una coppia nulla ad alte velocità. La particolarità di questi dispositivi è data dal fatto che riescono ad imprimere una coppia 10 volte superiore a quella ottenibile con gli altri attuatori a parità di volume, permettendo di raggiungere rapporti coppia/massa di 70 Nm/kg mantenendo il peso attorno ai 6 g [24]. Il loro peso, decisamente inferiore rispetto agli altri attuatori, li rendono particolarmente indicati per le interfacce aptiche portatili, ad esempio nelle giunture delle dita dei master per la mano. Questo genere di attuatori sono in grado di fare piccoli movimenti ad altissime frequenze e vengono sempre più sfruttati per la retroazione tattile, ad esempio il MAX11835 della Maxim, utilizzato nei touch-screen di ultima

generazione.

3.4.2 Attuatori magnetorestrittivi

Questi attuatori utilizzano i materiali magnetorestrittivi, che si espandono o si restringono quando vengono immersi in forti campi magnetici. Essi possono essere, ad esempio, costituiti da una barra di silicone elastomerico, con dei fili di materiale magnetoresistivo inseriti in posizioni eccentriche rispetto all'asse. Generando un campo magnetico, si provoca una contrazione del cavo e, dal momento che gli attuatori sono in posizione eccentrica rispetto all'asse, viene prodotto anche un momento, che determina la flessione della barra. L'utilizzo di due attuatori, in posizioni opposte rispetto all'asse, consente di attivare la barra in due direzioni opposte.

Questi dispositivi sono molto leggeri e sono in grado di imprimere forza massima relativamente elevata (ie. 10 N) con un peso complessivo molto ridotto (ie. 12 g) [25], permettendone l'utilizzo, ad esempio, negli esoscheletri.

3.4.3 Polimeri elettroattivi

Un ultimo tipo di attuatori è quello che utilizza i polimeri elettroattivi (EAP), cioè dei materiali che si muovono in risposta a stimoli elettrici. Il principio di funzionamento è semplice: una membrana costituita da questi materiali viene rivestita da entrambe le parti con degli elettrodi e viene collegata ad un circuito che permette di imprimere la tensione desiderata. In questo modo la membrana viene stimolata ottenendo una diminuzione dello spessore e un allungamento. La caratteristica più interessante dei polimeri elettroattivi è la loro abilità nell'emulare muscoli naturali, permettendo quindi di creare braccia robotiche in grado di simulare il movimento umano in maniera altamente realistica. Recentemente questi attuatori sono stati utilizzati in un progetto ancora in fase di sviluppo, il MEMICA, cioè un guanto in grado di dare una sensazione molto accurata di ciò che accade ad un robot che simula la presenza della mano dell'operatore in un ambiente virtuale .

Capitolo 4

Esempi di dispositivi aptici

4.1 Dispositivi aptici in commercio

4.1.1 PHANToM Master

Il PHANToM (Personal Haptic Interface Mechanism) è un interfaccia aptica da tavolo progettata per la retroazione di forza in ambienti virtuali [26] e commercializzata dalla Sensable Technologies Inc..

Il componente principale è un braccio meccanico dotato di sei DoF che termina con una penna utilizzata dall'operatore per comandarlo e per ricevere la retroazione di forza. Tre di questi gradi di libertà sono attivi, mentre l'orientamento dell'end-effector è passivo, cioè può ricevere i comandi, ma può applicare solo forze di traslazione (e non coppie) alla mano. Questo braccio meccanico è stato progettato molto ingegnosamente, infatti due dei tre attuatori retroattivi sono stati posizionati in maniera tale da controbilanciare il suo peso eliminando quindi la necessità di effettuare una compensazione della gravità per mantenerlo sollevato. Il PHANToM utilizza tre motori a corrente continua brushless con encoder ottici localizzati sul loro albero e un meccanismo trasmissione costituito da cavi e puleggie che li rende praticamente disaccoppiati (matrice di trasmissione quasi diagonale) facendo sembrare che l'interfaccia abbia la stessa inerzia (0.075 kg) e gli stessi attriti (0.06 N) da tutte le direzioni.

Il controllo avviene dal PC tramite una scheda elettronica molto compatta, un'interfaccia collegata al sensore di posizione e un amplificatore di potenza in cui

è presente un interruttore di sicurezza che permette di spegnere istantaneamente il braccio meccanico.

Esistono numerose implementazioni di questo dispositivo, che si differenziano soprattutto per le dimensioni e il numero di gradi di libertà, in particolare il PHANToM Desktop e il PHANToM 1.5/6.0 [27]. Il primo è di piccole dimensioni, può imprimere una forza di picco pari a 6.4 N e una forza massima senza surriscaldare gli attuatori di 1.7 N, mentre il secondo è più grande, può applicare una forza di picco di 8.5 N, ma soprattutto può generare una coppia di 515 mNm. Un'altro fattore molto importante che li differenzia è la banda richiesta per il controllo, che per il Desktop è di ben 1000 Hz, mentre per l'1.5 è di appena 15 Hz. I prezzi di questi master sono piuttosto elevati, infatti vanno dai \$16000 per il primo ai \$56000 per il secondo, ma rimangono comunque i dispositivi aptici più diffusi e utilizzati.



Figura 4.1: (a) PHANToM Desktop (b) PHANToM 1.5/6.0

4.1.2 HAPTIC Master

L'HAPTIC Master è un'interfaccia aptica pen-based progettata dalla FCS Control System in Olanda [28]. È un dispositivo con controllo in ammettenza che misura la forza applicata sull'end-effector dall'utente tramite un sensore e calcola la posizione, la velocità e l'accelerazione acquisite da un'oggetto virtuale a cui essa viene impressa. Il componente principale è un braccio robotico privo di giochi

meccanici e con pochi attriti, che permette un movimento molto scorrevole della penna ad esso collegata e viene controllato da un algoritmo che determina la posizione retroazionata da assumere a seguito dell'azione effettuata dall'operatore, eliminando gli effetti dovuto alla massa e agli attriti del meccanismo stesso. Nel complesso la struttura possiede tre DoF, uno per la rotazione della base e due per la traslazione verticale ed orizzontale del braccio, ottenendo uno spazio di lavoro tridimensionale di altezza 40 cm, larghezza 36cm e che copre un'angolo di circa un radiante; è inoltre possibile cambiare l'end-effector in base alle necessità e portare i gradi di libertà a sei installando una penna con tre nuovi assi di rotazione.

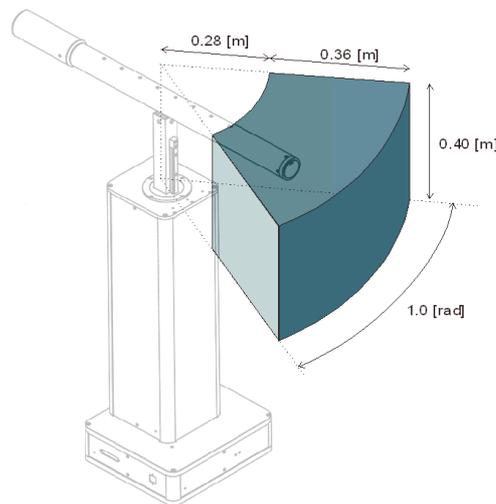


Figura 4.2: HAPTIC Master

Il controllo viene effettuato ad una frequenza di 2500 Hz, ben dieci volte superiore alla percezione umana, garantendo un livello di realismo della simulazione estremamente elevato. Il software utilizzato comprende un'interfaccia di programmazione per la creazione delle realtà virtuali da simulare, un sistema operativo e una serie di applicazioni legate alla sicurezza dell'operatore, alla comunicazione tra il pc e il dispositivo e alla determinazione della collisione con gli oggetti virtuali [29].

Le performance sono estremamente elevate, infatti ha una risoluzione della posizione di 4 μm (12 μm con 6 DoF), può determinare una forza applicata dall'operatore di 0.01 N, l'inerzia percepita sulla punta è di 2 kg e le forze nominale

e massima sono rispettivamente di 100 N e 250 N.

Per dare una rappresentazione del suo comportamento è possibile determinarne la funzione di trasferimento, che è data dal rapporto tra l'accelerazione misurata (a_m) e quella comandata (a_c):

$$H(\omega) = \frac{a_m(\omega)}{a_c(\omega)} \quad (4.1)$$

Assumendo quindi il sensore di forza infinitamente veloce, si ottiene una forza sull'end-effector proporzionale alla sua accelerazione.

Nonostante i costi piuttosto elevati (\$34000), grazie alle performance superiori a quelle dei suoi concorrenti, l'HAPTIC Master è comunque un'ottima soluzione in applicazioni come la simulazione delle realtà virtuali, la riabilitazione fisioterapica e la ricerca in ambito medico.

4.1.3 CyberForce Glove

Nel 1980 M. Andreucci progettò un master per la mano che si differenziava da tutti gli altri precedentemente prodotti poichè utilizzava dei tendini in Kevlar in sostituzione delle parti metalliche necessarie per la trasmissione della coppia alle dita, permettendo un sostanzioso alleggerimento dell'intera struttura. Il problema principale di questa struttura era dato dal fatto che le forze di attrito aumentavano di molto, così come la sua complessità, provocando grosse difficoltà nel suo controllo. Successivamente, nel 1993, Kramer sviluppò un master simile a quello precedentemente descritto, con l'aggiunta di un ditale per ogni dito della mano, che permetteva di avere una retroazione tattile oltre a quella di forza già presente. La posizione della mano veniva quindi determinata da dei sensori di posizione che inviavano le informazioni necessarie al controllore per ottenere tali retroazioni.

Nel 1995 la Virtual Technology Inc. annunciò la messa in commercio di un dispositivo basato sul progetto di Kramer, il CyberForce Glove, che veniva venduto ad un prezzo di circa \$14000. Successivamente, nel 2000, la compagnia Immersion acquisì la Virtual Technology Inc. e creò un sistema aptico costituito dai seguenti tre componenti [30]:

- **CyberGlove:** un guanto costituito da materiali deformabili dotato di 22 sensori, in grado di trasformare in tempo reale i movimenti della mano (flessione e abduzione delle dita) in dati digitali, con una risoluzione di 0.5° e una frequenza di lettura di 150 records/sec;
- **CyberGrasp:** un leggero esoscheletro che si posiziona sul CyberGlove dotato di cinque attuatori, uno per ogni dito della mano, in grado di esercitare una forza massima di 12 N;
- **CyberForce:** un dispositivo a sei DoF a cui viene agganciato il CyberGrasp, in grado di esercitare una forza massima di 8.8 N. Esso permette di determinare con precisione la posizione e l'angolazione del polso dell'operatore che indossa il CyberGlove all'interno di uno spazio di lavoro pari a 30×30 cm di traslazione e 133° di rotazione.



Figura 4.3: Sistema costituito da: CyberGlove, CyberGrasp e CyberForce.

Utilizzando un sistema del genere è quindi possibile simulare in maniera estremamente realistica e dettagliata la presa di oggetti tridimensionali all'interno di uno spazio di grandi dimensioni. Il prezzo complessivo è però decisamente elevato, infatti può arrivare a costare fino a \$100000.

4.2 Prototipi di dispositivi aptici

4.2.1 Joystick sferico di Adelstein-Rosen

Questa particolare configurazione di joystick sferica venne sviluppata da Adelstein e Rosen nel 1992 per lo studio dei tremori della mano [31]. Gli attuatori utilizzati sono due motori in corrente continua con magneti permanenti comandati che hanno delle oscillazioni minime e permettono una coppia di stallo di 5 Nm e una forza continua per ogni grado di libertà dell'impugnatura di 20 N. Gli spostamenti del joystick sono quindi rilevati da encoder ottici agganciati ad ogni motore con una risoluzione di 0.044° relativamente all'albero motore e di $176 \mu\text{m}$ per l'impugnatura, mentre le velocità di spostamento sono rilevate da dei tachimetri montati sui motori, quindi non è necessario differenziare le posizioni dei giunti. La larghezza di banda della retroazione è all'incirca di 48 Hz e le forze (\mathbf{F}_x e \mathbf{F}_y) sulla manopola possono essere messe in relazione alle coppie degli attuatori (τ_α, τ_β) dalle seguenti relazioni:

$$\mathbf{F}_x = \frac{\cos\beta \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sin^2\beta}}{R_0 \cos\alpha} \tau_\alpha \quad (4.2)$$

$$\mathbf{F}_y = -\frac{\cos\alpha \sqrt{1 - \sin^2\alpha \sin^2\beta}}{R_0 \cos\beta} \tau_\beta \quad (4.3)$$

Dove R_0 è la lunghezza del braccio meccanico dall'impugnatura all'origine degli assi e α e β sono gli angoli rispetto ai due assi di rotazione.

4.2.2 PiRoGa5

Il PiRoGa5[32] è un'interfaccia aptica a cinque DoF con un end-effector a forma di penna; ad essa sono collegati tre cavi sulla parte superiore e altri tre su quella inferiore, ed ognuno di essi è mantenuto in tensione da un sistema di motori elettrici (muniti di encoder) e pulegge. L'operatore è in grado di muovere la penna lungo sei DoF, mentre il sistema di controllo può applicare solo tre forze e due coppie, impedendo che ne vengano generate lungo l'asse della penna. I cavi passano attraverso dei bulloni e si vengono a creare due piani paralleli distanziati di 35

mm, costituiti da tre collegamenti i cui vertici formano un triangolo rettangolo di lato 275 mm. Per come è strutturato l'intero dispositivo, la forza complessiva che agisce sull'end-effector è data dalla composizione di due forze, una applicata all'estremità superiore ed una applicata a quella inferiore. La cinematica del PiRoGa5 può essere facilmente determinata poichè i cavi sono costretti a passare attraverso i bulloni prima di arrivare alle pulegge, permettendo una soluzione della cinematica in forma chiusa. Dal momento che vi è una ridondanza nell'attuazione, è possibile determinare la posizione della penna in sei modi diversi, considerando i valori letti dagli encoder di cinque attuatori e trascurandone uno.



Figura 4.4: PIROGA5

Poichè la lunghezza della penna è variabile, consideriamo separatamente le posizioni della sua estremità superiore $P_u = \{x_u, y_u, z_u\}^T$ e di quella inferiore $P_l = \{x_l, y_l, z_l\}^T$ senza imporre alcun tipo di vincolo sulla lunghezza della penna. P_l e P_u sono quindi dati dall'intersezione di tre sfere conosciute, ed è possibile determinare la posizione della punta virtuale tramite la seguente equazione:

$$P_t = P_l - s\mathbf{u} \quad (4.4)$$

Dove s è l'offset rispetto a P_l (per $s = 0$ allora $P_t = P_l$), mentre \mathbf{u} è il versore dell'asse della penna:

$$\mathbf{u} = \frac{(P_u - P_l)}{\|P_u - P_l\|} = \{u_x, u_y, u_z\}^T \quad (4.5)$$

L'equilibrio delle forze agenti sul PIRoGa5 è dato dalla seguente equazione:

$$[\mathbf{S}_1 \mathbf{S}_2 \mathbf{S}_3 \mathbf{S}_4 \mathbf{S}_5 \mathbf{S}_6] \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_{O,j} \\ M_{O,k} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

dove $f_i \geq 0$ è la tensione sul cavo i -esimo, F_x, F_y, F_z sono le componenti delle forze esercitate sul terminale e M_O è il momento applicato sulla penna e proiettato lungo due assi \mathbf{k} e \mathbf{j} . I termini \mathbf{S}_i sono invece le spinte con torsione relative ad ogni cavo, che possono essere ottenuti dalla seguente equazione:

$$\mathbf{S}_i = \begin{pmatrix} v_{ix} \\ v_{jy} \\ v_{jz} \\ \frac{l}{2}(\mathbf{u} \wedge \mathbf{v}_i) \times \mathbf{j} \\ \frac{l}{2}(\mathbf{u} \wedge \mathbf{v}_i) \times \mathbf{k} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

dove $\mathbf{v}_j = \{v_{jx}, v_{jy}, v_{jz}\}^T$ è il versore relativo al i -esimo cavo e \mathbf{j} \mathbf{k} sono i due versori ortogonali del piano normale ad \mathbf{u} .

Questo dispositivo ha una struttura molto semplice, leggera, poco costosa e molto trasparente, ma ha lo svantaggio di poter generare solo tre forze e due coppie sull'end-effector utilizzando sei attuatori. Lo spazio di lavoro è, inoltre, limitato dalla presenza dei cavi che possono intralciare la mano dell'operatore, ma essendo ben definito, l'utente non deve controllare la loro posizione durante il suo operato.

4.2.3 SPIDAR

SPIDAR (SPace Interface Device for Artificial Reality) è un'interfaccia aptica a corde fissata al tavolo sviluppata nel 1993 da Ishii e Sato presso l'istituto tecnologico di Tokyo. È costituito da quattro corde che partono dai vertici di un cubo metallico e arrivano ad una capsula centrale in cui l'operatore inserisce il dito e

comanda il dispositivo. La lunghezza di ogni cavo viene misurata da degli encoder sui motori in corrente continua con una risoluzione di 0.503 mm, permettendo di determinare la posizione spaziale del ditale in funzione delle lunghezze $l_0 \dots l_3$ delle corde e del lato a della struttura:

$$x = \frac{l_0^2 + l_1^2 - l_2^2 - l_3^2}{8a} \quad (4.8)$$

$$y = \frac{l_0^2 - l_1^2 + l_2^2 - l_3^2}{8a} \quad (4.9)$$

$$z = \frac{l_0^2 - l_1^2 - l_2^2 + l_3^2}{8a}$$

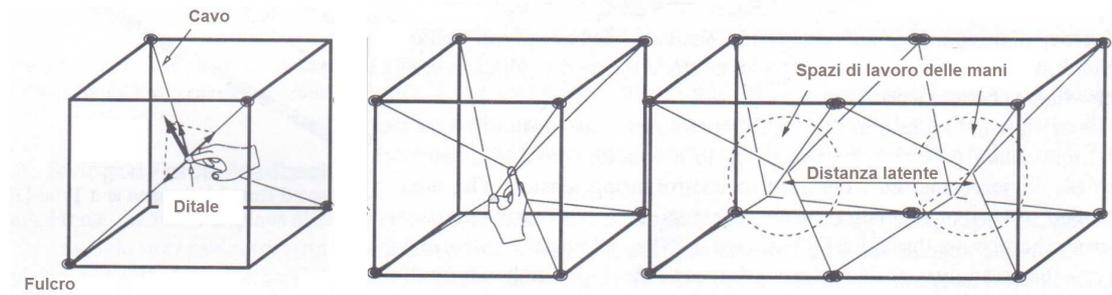


Figura 4.5: (a) SPIDAR (b) SPIDAR II

L'incertezza di posizione del ditale dipende dalla risoluzione δ degli encoder (0.503mm) ed è rappresentata dal volume:

$$\Delta = \left[\frac{(\sum_{i=0}^3 l_i) \delta}{4a} \right]^3 \quad (4.10)$$

La forza risultante sentita dall'utente \mathbf{F} è in funzione delle tensioni di ogni corda a_i (0 - 4 N) e dai versori delle tensioni \mathbf{u}_i :

$$\mathbf{F} = \sum_{i=0}^3 a_i \mathbf{u}_i \quad (4.11)$$

Successivamente lo SPIDAR venne modificato per permettere una retroazione sia al pollice che all'indice, portando ad avere un totale di otto corde, che in alcuni casi di abduzione/adduzione potevano interferire tra loro limitando leggermente i

movimenti dell'utente. Questa innovazione, che portò alla nascita dello SPIDAR II, permise di simulare la presa di oggetti di diametro massimo di 5 cm e di sentirne il peso all'interno di uno spazio di lavoro sferico di diametro 30 cm. Una terza ed ultima modifica di questo dispositivo portò ad inserire due SPIDAR II in un'unica struttura e di permettere quindi l'utilizzo di entrambe le mani da parte dell'operatore. Per impedire che le corde dei due dispositivi si possano intralciare tra loro, si definisce la distanza latente, cioè la distanza tra i centri degli spazi di lavoro sferici tale per cui, quando le mani dell'operatore si trovano a quella distanza, allora quelle virtuali della simulazione si toccano tra loro. La simulazione viene quindi rappresentata su un display a 75 cm dall'utente con un rate di aggiornamento dell'immagine di 10 frame al secondo.

4.2.4 JPL Universal Master

Uno dei primi master universali venne sviluppato nel 1980 da Bejcy e Salisbury presso il laboratorio di propulsione dei jet (JPL) della NASA. Questa interfaccia a sei DoF ha un'impugnatura in grado di ruotare lungo tre direzioni e di ruotare e traslare rispetto ad un supporto fissato al pavimento

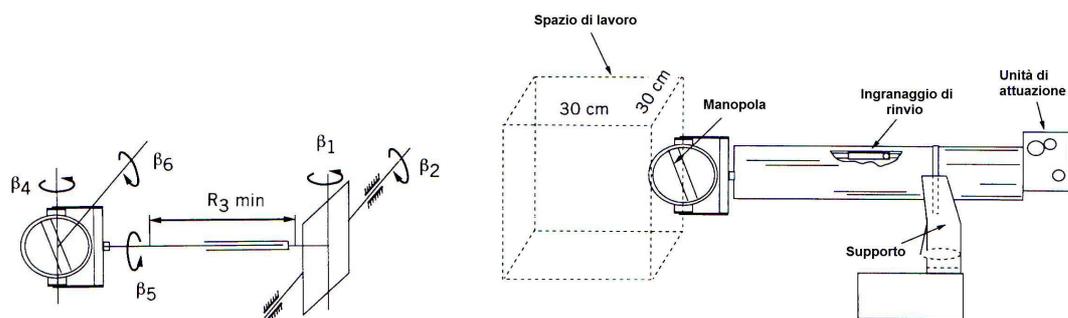


Figura 4.6: Il master universale JPL

In figura 6 si possono vedere gli assi di rotazione della manopola (β_4 , β_5 , β_6) con una range di movimento di $\pm 180^\circ$, l'asse di traslazione relativo alla base (R_3) e i due assi di rotazione della base (β_1 , β_2), che possono variare rispettivamente da 0 a 30 cm e di $\pm 20^\circ$, ottenendo uno spazio di lavoro di 30x30x30 cm. Il moto dell'impugnatura si ottiene grazie a trasmissioni collegate a dei motori posizionati

nell'unità di attuazione, che è ferma rispetto ad essa ed ha una posizione relativamente distante per minimizzare il peso sostenuto dall'utente e per bilanciare l'intera struttura. Un meccanismo di ritorno si muove quindi nella direzione opposta a R_3 , per tenere fisso il centro di gravità e per mantenere tesi i cavi delle trasmissioni.

La posizione cartesiana dell'impugnatura $(x_{hand}, y_{hand}, z_{hand})$ può essere rappresentata in funzione agli angoli dei giunti precedentemente elencati secondo le seguenti equazioni:

$$x_{hand} = R_3 \cos \beta_1 \sin \beta_2 \quad (4.12)$$

$$y_{hand} = R_3 \sin \beta_1 \sin \beta_2 - \frac{1}{2}(R_{3max} - R_{3min}) \quad (4.13)$$

$$z_{hand} = -R_3 \cos \beta_2 \quad (4.14)$$

Allo stesso modo, gli angoli di rotazione della manopola rispetto ai valori dei giunti sono:

$$\alpha_4 = \beta_1 - \beta_4 \quad (4.15)$$

$$\alpha_5 = \beta_5 \quad (4.16)$$

$$\alpha_6 = \beta_2 - \beta_6 \quad (4.17)$$

Infine le relazioni tra le forze cartesiane $(\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y, \mathbf{F}_z)$ sull'oggetto virtuale e le forze e le coppie che devono essere applicate sugli assi β_1 , β_2 e R_3 sono:

$$\begin{aligned} \tau_{\beta_1} = & -nR_3[\mathbf{F}_x(\cos \beta_4 \cos \beta_5 \cos \beta_6 + \sin \beta_4 \sin \beta_6) \\ & + \mathbf{F}_y(\sin \beta_4 \cos \beta_6 - \cos \beta_4 \cos \beta_5 \sin \beta_6) \\ & + \mathbf{F}_z(\cos \beta_4 \sin \beta_5)] \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \tau_{\beta_2} = nR_3[\mathbf{F}_x(\sin\beta_5 \cos\beta_6) - \mathbf{F}_y(\sin\beta_5 \sin\beta_6) \\ - \mathbf{F}_z(\cos\beta_5)] \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{R_3} = n[\mathbf{F}_x(\sin\beta_4 \cos\beta_5 \cos\beta_6 - \cos\beta_4 \sin\beta_6) \\ - \mathbf{F}_y(\sin\beta_4 \cos\beta_5 \sin\beta_6 + \cos\beta_4 \cos\beta_6) \\ + \mathbf{F}_z(\sin\beta_4 \sin\beta_5)] \end{aligned} \quad (4.20)$$

dove n è un fattore di forma.

La forza applicabile alla manopola è di 9.8N e la coppia è di 0.5 Nm, con una forza d'attrito massima pari al 5% dell'uscita. Questo basso valore d'attrito, combinato con una piccola inerzia dell'impugnatura (meno di $1kg/cm^2$), aumenta notevolmente la precisione dell'interfaccia; inoltre, i semplici movimenti effettuabili associati all'ottimo bilanciamento del dispositivo, riducono il carico di operazioni in tempo reale del controllo, che richiede quindi una larghezza di banda di appena 40 Hz [33]. Più recentemente il JPL venne dotato di un master per la mano aumentando il numero di gradi di libertà a 16 e permettendo di effettuare teleoperazioni con una retroazione anche sulle dita [34]. Ogni dito dell'esoscheletro possiede un sensore di posizione, un sensore di forza e dei cavi flessibili che trasmettono la coppia degli attuatori posizionati in un'unità a parte per non gravare troppo sul peso del terminale (circa 1 kg).

4.2.5 Shape approximation device

Il dispositivo per l'approssimazione delle forme(SAD) è un braccio robotico sviluppato nel 1994 da Tachi e i suoi collaboratori [35] presso l'università di Tokyo. Questo sistema simula la sensazione del contatto durante l'interazione con superfici di varie forme e impedenze all'interno di un ambiente virtuale.

Esso è costituito da un esoscheletro a sette DoF indossato dall'utente, necessario alla misurazione della posizione e l'orientazione di un dito della mano, e da un manipolatore a sei DoF (Active Environment Display) che si muove per

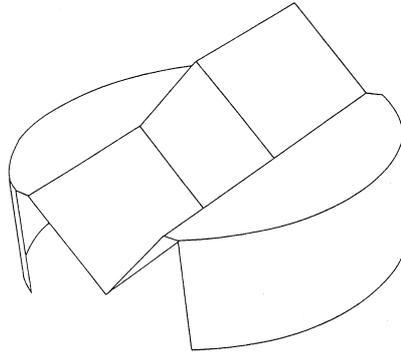


Figura 4.7: Shape approximation device

anticipare e, in alcuni casi, opporsi alle azioni dell'operatore dando la sensazione di contatto con una superficie e permettendo operazioni di rotazione (

180°), straorzata (360°) e spostamento longitudinale (135°) all'interno di un volume di 60x60x60 cm.

Il manipolatore possiede un dispositivo composto da una superficie geometrica complessa data da vertici, bordi concavi/convessi e tratti piani, che permette la simulazione delle superfici continue muovendo l'esoscheletro nel piano tangente al punto di contatto. L'operatore indossa un casco su cui è montato uno schermo che lo immerge nel mondo virtuale evitando che possa vedere il braccio manipolatore e rendendo molto più reale la simulazione.

Conclusioni

Nonostante la tecnologia studiata si sia rivelata acerba e per ora soltanto agli inizi del suo sviluppo, non pochi sembrano i campi applicativi in cui i dispositivi aptici possono e potranno sostenere un ruolo fondamentale. Attualmente le apparecchiature vengono commercializzate assieme a sistemi di sviluppo grazie ai quali è possibile realizzare applicazioni software specializzate. Un uso frequente si è riscontrato nel campo della grafica computerizzata e in simulazioni virtuali a scopo ludico o di apprendimento guidato, che possono essere rese maggiormente reali grazie all'introduzione di apparecchiature aptiche. Questa tecnologia fornisce un valido contributo innovativo anche nelle applicazioni sanitarie, ad esempio nella telechirurgia, dove si permette al medico di eseguire interventi complessi a distanza e senza recarsi sul luogo dell'operazione oppure si dà la possibilità all'apprendista di avere una sensazione reale dell'intervento senza la necessità di agire su un paziente in carne ed ossa. In generale l'aptica può ritenersi utile in tutte quelle discipline o lavori che richiedono procedure di apprendimento costose e spesso complesse da mettere in atto, oltre che rischiose: basti pensare a simulatori di pilotaggio di navette spaziali o più semplicemente aeroplani militari in situazione di battaglia. Da tenere presente è il supporto che questi dispositivi possono portare a individui con handicap fisici: grazie ai moltiplicatori di forza è possibile sostenere disabili con difficoltà motorie e affiancando queste interfacce a speciali apparecchiature sonore è possibile rendere 'visibili' attraverso il tatto figure e oggetti a persone non vedenti.

Indice analitico

- aste flessibili, 14
- attuatori, 39
- attuatori a polimeri elettroattivi, 44
- attuatori idraulici, 42
- attuatori magnetorestrittivi, 44
- attuatori piezoelettrici, 43
- attuatori pneumatici, 42
- azione doppia, 42
- azione in avanti, 25
- azione singola, 42

- braccia robotiche, 8

- canale di comunicazione, 20
- cisterna, 42
- compensatore, 25
- compensazione della gravità, 12, 45
- condizioni di Llewellyn, 22
- controllo, 24
- controllo a due canali, 29
- controllo ad impedenza, 24
- controllo bilaterale, 25
- controllo in ammettenza, 24
- CyberForce, 49
- CyberGlove, 49
- CyberGrasp, 49

- display aptico, XIII

- dispositivi master-slave, 19

- EFF, 11
- esoscheletri, 10
- esoscheletri per le braccia, 12

- guanto di percezione, 6

- HAPTIC Master, 46
- HFF, 11

- immettenza, 21
- interazione assistita, XIV
- interfacce non portatili, 2
- interfacce portatili, 11
- interfaccia aptica, XIII

- Jacobiana, 12
- joystick, 3
- joystick a levitazione magnetica, 4
- joystick cartesiani, 3
- joystick sferici, 3
- JPL, 54

- master, 19
- master a corda, 5
- master universali, 6
- motori DC a spazzole, 40
- motori DC brushless, 41
- motori elettrici, 40

parametri del controllo, 25
parametri ibirdi, 34
parametri ibridi, 28, 31
parametro di stabilità, 22
pen-based, 4
PHANToM, 45
piattaforme mobili, 8
PiRoGa5, 50
pistoni, 43
pompa idraulica, 42
propriocezione, 2

retroazione cinestetica, 1
retroazione di forza, 1, 34
retroazione tattile, 1
robot, 7
robustezza della stabilità, 29
rotore, 40

serbatoio, 42
simulazione, XIV
sistema pneumatico, 42
slave, 19
smorzamento, 32
SPIDAR, 52
stabilità, 19
statore, 40

telechirurgia, 59
teleoperazione, XIV
trasparenza, 19
trasparenza perfetta, 20

valvole, 42

Elenco dei simboli

absolute stability: stabilità assoluta

actuator: attuatore

admittance: ammettenza

cartesian: cartesiano

communication channel: canale di comunicazione

control: controllo

damping: smorzamento

exoskeleton: esoscheletro

feedforward: azione in avanti

force feedback: retroazione di forza

glove: guanto

haptic: aptico

ibrid: ibridi

immittance: immettenza

impedance: impedenza

interaction: interazione

interface: interfaccia

kinesthetic feedback: retroazione cinestetica

magnetic levitation: levitazione magnetica

platform: piattaforma

proprioception: propiocezione

robustness: robustezza

rotor: rotore

simulation: simulazione

spherical: sferico

stability: stabilità

stator: statore

tactile feedback: retroazione tattile

teleoperation: teleoperazione

transparency: trasparenza

Bibliografia

- [1] G. Burdea, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- [2] W. Kim and A. Bejczy, "Graphical displays for operator aid in telemanipulation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, New York, October 1991, p. 9.
- [3] B. Jackson and L. Rosenberg, *Force Feedback and Medical Simulation*. Amsterdam: IOS Press, 1995.
- [4] R. Cholewiak and A. Collins, *Sensory and Physiological Bases of Touch*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 1991.
- [5] R. Kalawsky, *The Scienze of Virtual Reality and Virtual Envirorments*. UK: Addison-Wesley, 1993.
- [6] M. Bergamasco, "The glad-in-art project," in *Virtual Reality. Anwendugen und Trends*, Berlin, February 1993, pp. 251–258.
- [7] M. Begamasco, B. Allotta, L. Bosio, L. Ferretti, G. Parrini, G. Prisco, F. Salsedo, and F. Sartini, "An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual enviroirments applications," in *Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, May 1994, pp. 1449–1454.
- [8] T. Sheridan, "Musing on telepresence and virtual presence," *Presence-Teleoperators and Virtual Envirorments*, vol. MIT Press, no. 1, pp. 120–126, 1992.

-
- [9] D. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, pp. 624–637, 1993.
- [10] Y. Yokokohji and T. Yoshikawa, "Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinematic coupling formulation and experiment," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, New York, 1993, pp. 605–620.
- [11] K. Hashtrudi-Zaad and S. Salcudean, "On the use of local force feedback for transparent teleoperation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, 1999, pp. 1863–1869.
- [12] S. Haykin, *Active Network Theory*. Reading, UK: Addison-Wesley, 1970.
- [13] R. Adams and B. Hannaford, "Stable haptic interaction with virtual environments," *IEEE Transactions on Robotic and Automation*, vol. 15, pp. 465–474, 1999.
- [14] G. Raju, G. Verghese, and T. Sheridan, "Bilateral control of teleoperators with time delay," *IEEE Transactions of Automation and Control*, vol. 34, pp. 494–501, 1989.
- [15] R. Anderson and M. Spong, "Design issues in 2-port network models of bilateral remote manipulation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, 1989, pp. 1316–1321.
- [16] J. Colgate and N. Hogan, "Robust stability of dynamically interacting systems," *International Journal of Control*, vol. 48, pp. 65–88, 1988.
- [17] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, pp. 426–434, 1989.
- [18] —, "Stability and performance tradeoffs in bilateral telemanipulation," in *IEEE Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, 1989, pp. 1764–1767.

- [19] S. Salcudean, J. Yan, J. Hu, and P. Loewen, "Performance trade-offs in optimization-based teleoperation controller design with applications to microsurgery experiments," in *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, British Columbia, 1995, pp. 631–640.
- [20] B. Hannaford and R. Anderson, "Experimental and simulations of hard contact in force reflecting teleoperation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, 1988, pp. 584–589.
- [21] K. Hashtrudi-Zaad and S. Salcudean, "Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and," in *The International Journal of Robotics Research*, Detroit, 2001, pp. 419–446.
- [22] M. Russo and A. Tadros, "Controlling dissipative magnetic particle brakes in force reflective devices," *Advances in Robotics*, vol. DSC, no. 42, pp. 63–70, 1992.
- [23] R. Sanchez, E. Wolbrecht, R. Smith, J. Liu, S. Rao, S. Cramer, T. Rahman, E. Bobrow, and D. J. Reinkensmeyer, "A pneumatic robot for re-training arm movement after stroke: Rationale and mechanical design," in *Proceedings of the 2005 IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Chicago, IL, USA, June 28 - July 1 2005.
- [24] C. Hasser, *Force-Reflecting Anthropomorphic Hand Masters*. OH: Wright-Patterson, 1995.
- [25] O. Brimhall, *Advanced Development of New Actuators for Human Sensory Feedback*, February 1995.
- [26] T. Massie and K. Salisbury, "The phantom haptic interfaces: A device for probing virtual objects," *ASME Winter Annual Meeting*, vol. DSC, no. 55, pp. 295–30, 1994.
- [27] <http://www.Sensable.com>.

-
- [28] G. Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
- [29] R. V. der Linde, P. Lammertse, E. Frederiksen, and B. Ruiters, "The hapticmaster, a new high-performance haptic interface," in *Eurohaptics'02*, Edinburg, 2002, pp. 80–107.
- [30] <http://www.Immersion.com>.
- [31] B. Adelstein and M. Rosen, "Design and implementation of a force reflecting manipulation for manual control research," *Proceedings of ASME WAM*, vol. DSC, no. 42, pp. 1–12, 1992.
- [32] G. Rosati, D. Zanotto, and A. Rossi, "Performance assessment of a 3d cable-driven haptic device," in *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE 2008*, Boston, MA, USA, Oct 31 - Nov 6 2008.
- [33] A. Bejczy and K. Salisbury, "Kinematic coupling between operator and remote manipulator," *Advances in Computer Tecnology*, vol. ASME, no. 1, pp. 197–211, 1980.
- [34] B. Jau, "Man equivalent telepresence through four fingered human-like hand system," in *Proceedings of 1992 IEEE Robotics and Automation Conference, IEEE*, New York, 1992.
- [35] S. Tachi, T. Maeda, R. Hirata, and H. Hoshino, "A construction method of virtual haptic space," in *Proceedings of The Fourth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence*, 1994.

Ringraziamenti

Ringrazio di cuore la mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto in questi tre anni, la mia fidanzata Nicoletta, che mi è stata vicina ed è anche stata di grandissimo aiuto nella fase di stesura di questa tesi, il mio caro amico Alfredo, che è stato un fratello ed un compagno insostituibile, alcuni miei compagni di corso, che hanno reso più belle le mie giornate, i miei amici, che hanno saputo starmi vicino nonostante i mesi di clausura da ingegnere e senza i quali non sarei mai potuto arrivare fin qui. Ringrazio infine il professor Giulio Rosati, che mi ha guidato e aiutato in questi ultimi passi della mia laurea.