

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA



Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea

TITOLO della TESI

**Progettazione e realizzazione di un display
tattile immersivo per stimolazione multi-dito**

Candidato/i

Giuseppe Pelle

Relatori:

Ch.mo Prof. Ing. Antonio Bicchi

Ing. Nicola Sgambelluri

Anno Accademico 2005/2006

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Obiettivi della tesi	1
1.2	Interfacce Aptiche	2
1.3	Interfacce “multi-contatto”	5
1.4	Fasi dello studio	5
2	Studio analitico del CASR display	7
2.1	Introduzione	7
2.2	Il CASR display	7
2.3	Descrizione del CASR display	8
2.4	Analisi geometrica del “CASR display”	11
2.5	Caratterizzazione del materiale	17
2.6	Simulazione con il “CASR display” degli oggetti reali	23
2.7	Descrizione del sistema di gestione del CASR display	24
2.8	Controllo del CASR display	26
2.8.1	Controllo Inseguimento di Forza/Area	26
2.8.2	Controllo Inseguimento di Forza/Posizione	30
2.9	Conclusioni sui risultati sperimentali sul CASR	32
3	Integrazione cutanea e cinestetica	35
3.1	Introduzione	35
3.2	Il dispositivo aptico DELTA	35
3.3	Descrizione del dispositivo integrato	36
3.4	Studio analitico e controllo	36
3.4.1	Controllo basato sulla teoria di <i>Hertz</i>	38

INDICE

3.4.2	Controllo basato su curve teoriche	39
4	Progettazione manipolatore a tre dita	45
4.1	Introduzione	45
4.2	Dimensionamento del dispositivo per una presa ergonomica	46
4.2.1	Approcci del setup sperimentale	46
4.3	Descrizione del setup sperimentale	48
4.4	Sensori di forza e di posizione	52
4.5	Specifiche delle celle	54
4.5.1	Soluzione con le celle montate sulla base del CASR	55
4.5.2	Soluzione con le celle montate frontalmente rispetto ai CASR	58
4.6	Considerazioni per la scelta del dispositivo da realizzare	60
5	Considerazioni conclusive sul dispositivo Multi-Dito e risultati sperimentali	63
5.1	Risultati sperimentali	64
5.2	Osservazioni	67
6	Conclusioni	69
A	Sensori di Forza e di posizione	73
A.1	Principi di funzionamento dei sensori ad effetto <i>Hall</i>	73
A.2	Principio di funzionamento delle celle di carico	74
B	Descrizione dell'elettronica di controllo	77
B.1	Introduzione	77
B.2	Elettrovalvole	77
B.2.1	Principi di funzionamento	77
B.2.2	Caratteristiche tecniche	79
B.3	Amplificatori per le Celle di carico	81

Elenco delle figure

1.1	Delta-device della Force Dimension in varie configurazioni. . .	2
1.2	Il Phantom	3
1.3	Dispositivi per la stimolazione tattile che impiegano fluido magnetoreologico	4
1.4	Stimolatore tattile costituito da una matrice di pistoncini . . .	4
2.1	CASR display	8
2.2	Curve forza/area tra oggetti con diverso modulo E secondo il modello Hertziano	9
2.3	Curve forza/area tra oggetti con diverso raggio R ma stesso modulo E secondo il modello Hertziano	9
2.4	Schema di funzionamento del casr display	10
2.5	Caratteristiche forza/area e forza tempo del CASR considerato come un dispositivo discreto	12
2.6	Rappresentazione approssimata del CASR	13
2.7	Caratteristica forza/area ottenuta con il CASR e parametrizzata rispetto alla pressione	14
2.8	Equilibrio tra P e P_{int}	15
2.9	Cono immaginario descritto dalle superfici inferiori dei cilindretti al crescere del δ_c	16
2.10	Superfici di contatto secondo la teoria di Hertz nel caso: (a)Due sfere, (b)Due cilindri.	18
2.11	Schema del contatto Hertziano tra due superfici curve.	20
2.12	Schema semplificato del sistema di gestione del CASR display	25
2.13	Schema di controllo a blocchi generale del CASR display. . . .	27

ELENCO DELLE FIGURE

2.14	Schema a blocchi dettagliato del controllo “Inseguimento di Forza/Area” del CASR display, eseguito con Simulink, nel caso di inseguimento della curva Forza/Area data dalla teoria Hertziana.	28
2.15	Curva di inseguimento tra la forza del CASR e quella di riferimento.	29
2.16	Displacement tra la deformazione del CASR e quella di riferimento.	30
2.17	Schema a blocchi dettagliato del controllo “Inseguimento di Forza/Posizione” del CASR display, eseguito con Simulink, nel caso di inseguimento della curva Forza/Posizione data dalla teoria Hertziana.	31
2.18	Curva di inseguimento tra la forza del CASR e quella di riferimento.	31
2.19	Displacement tra la superficie del CASR e quella di riferimento.	32
3.1	Schema dell’integrazione fra dispositivo cinestetico DELTA e cutaneo CASR (sinistra) e setup sperimentale utilizzato (destra).	37
3.2	Schema di controllo a blocchi generale per il sistema integrato cutaneo e cinestetico	37
3.3	Schema a blocchi dettagliato, del controllo basato sulla teoria di Hertz, per il sistema integrato cutaneo e cinestetico	38
3.4	Inseguimento tra la superfici di contatto generata dal CASR durante la simulazione e quella di riferimento.	40
3.5	Schema a blocchi dettagliato, del controllo basato su curve teoriche, per il sistema integrato cutaneo e cinestetico	41
3.6	Displacement tra la deformazione del CASR e quello di riferimento.	42
3.7	Inseguimento tra la superfici di contatto generata dal CASR durante la simulazione e quella di riferimento.	42
4.1	Foglio con le circonferenze per il setup sperimentale di afferaggio.	48
4.2	Postazione per le prove di presa.	49

ELENCO DELLE FIGURE

4.3	Postazione per le prove di presa.	50
4.4	Immagine rappresentativa del test.	51
4.5	Valori medi, espressi in gradi, ottenuti dalle prove di presa.	52
4.6	Grafico che rappresenta l'ergonomicità degli oggetti.	53
4.7	Cella di carico a bottone BC 302-100Kg	54
4.8	Cella di carico XFTC311 SERIES	55
4.9	Rappresentazione schematica del vecchio CASR display (sinistra) e di quello nuovo (destra), con le rispettive dimensioni di ingombro. Le dimensioni riportate in figura sono espresse in cm.	56
4.10	CASR esploso	57
4.11	Complessivo	57
4.12	Complessivo CASR con cella di carico	58
4.13	Complessivo seconda soluzione	59
4.14	CASR per la seconda soluzione esploso	59
4.15	Complessivo CASR con cella di carico	60
5.1	Andamento delle forze (sopra) e andamento delle deformazioni (sotto), esercitate dal pollice, dall'indice e dal medio durante la simulazione di presa di un oggetto ottenuto mandando nei tre CASR una pressione costante di 1,5 bar.	65
5.2	Andamento delle forze (sopra) e andamento delle deformazioni (sotto), esercitate dal pollice, dall'indice e dal medio durante la simulazione di presa di un oggetto ottenuto mandando nei tre CASR una pressione costante di 1 bar.	66
5.3	Andamento delle forze (sopra) e andamento delle deformazioni (sotto), esercitate dal pollice, dall'indice e dal medio durante la simulazione di presa di un oggetto ottenuto mandando nel CASR corrispondente al pollice una pressione costante di 1,5 bar, in quello corrispondente all'indice una pressione costante di 1,25 bar e nel CASR corrispondente al medio una pressione costante di 1 bar.	67
A.1	Schema di funzionamento delle'effetto <i>Hall</i>	73

ELENCO DELLE FIGURE

A.2	Schema di un Ponte di Wheatstone	75
B.1	Elettrovalvola ITV2000	78
B.2	Diagramma di funzionamento delle elettrovalvole	78
B.3	Diagramma a blocchi delle elettrovalvole	79
B.4	Circuito elettrico delle elettrovalvole	80

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Obiettivi della tesi

Negli ultimi anni, nonostante la ricerca nel settore delle interfacce aptiche abbia avuto un notevole interesse e sviluppo, le possibilità di utilizzo delle attuali tecnologie aptiche sono ancora molto limitate [20].

Lo svantaggio principale della gran parte dei dispositivi aptici commerciali disponibili è rappresentato dal fatto che l'interazione con gli ambienti di realtà virtuale avviene attraverso un unico punto di contatto e spesso senza stimolazione della percezione cutanea.

L'interazione mediante un solo punto di contatto limita le percezioni e le azioni che l'utente può compiere. Per esempio, il singolo punto di contatto rende impossibile effettuare azioni come la presa, la manipolazione e l'esplorazione tattile naturale di oggetti virtuali.

L'obiettivo di questo studio consiste nella progettazione e nella realizzazione di un dispositivo aptico in grado di realizzare un'interazione multi contatto con gli oggetti, stimolando in maniera più naturale la percezione della mano.

1.2 Interfacce Aptiche

L’Aptica è la scienza che si occupa dell’applicazione delle sensazioni tattili nell’interazione tra uomo e macchina, comunemente un computer. In particolare si intende per “dispositivo aptico” uno strumento di input/output che fa da tramite tra macchina e l’utente durante la manipolazione degli oggetti virtuali. Un semplice esempio di interfaccia aptica è il joystick o il guanto elettronico che sono capaci di interagire e percepire il movimento del corpo.

Le interfacce aptiche sono molto versatili, infatti consentono agli utenti di interagire con gli oggetti virtuali secondo svariate configurazioni: possono essere impiegati da soli o accoppiati con altri dispositivi aptici per aumentarne l’efficacia e l’efficienza. Numerosi sono i campi di impiego di questi dispositivi, come ad esempio: la chirurgia, l’astronautica, la meccanica, la telemanipolazione, l’addestramento ecc...

I dispositivi aptici possono essere classificati secondo diversi criteri. Dal nostro punto di vista essi possono essere divisi in dispositivi a contatto non-diretto e dispositivi a contatto diretto secondo le seguenti definizioni:

- Dispositivi a contatto non-diretto (due esempi possono essere visti in figura(1.1) e in figura(1.2)):



Figura 1.1: Delta-device della Force Dimension in varie configurazioni.

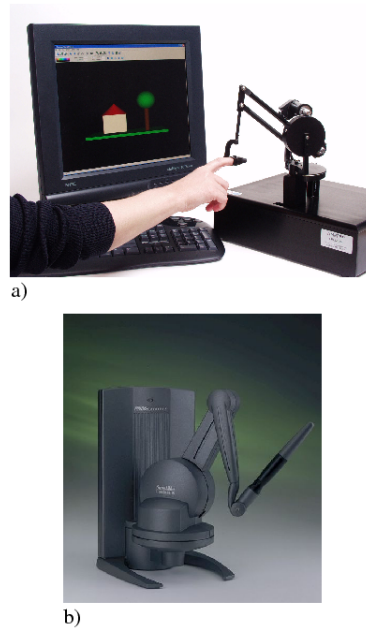


Figura 1.2: Due configurazioni del Phantom: nella configurazione a) si interagisce mediante un ditale, e nella b) l'organo terminale è una penna.

L'utente interagisce mediante uno strumento terminale o attraverso un ditale posto all'estremità del dispositivo che è capace di riprodurre con grande precisione le forze generate dal contatto tra strumento ed ambiente virtuale. La simulazione aptica è mediata attraverso un oggetto interposto che agisce come filtro meccanico e che può affievolire la percezione tattile causata dalla stimolazione meccanica. In genere questo tipo di feedback è definito come cinestetico per distinguerlo da quello tattile in cui si ha una diretta stimolazione del polpastrello. Le informazioni cinestetiche si riferiscono alla geometria, alla cinetica e alla forza di attuazione degli arti. Queste sensazioni, nell'uomo, sono mediate da diversi recettori sensoriali posti nei muscoli, nelle capsule articolari e nei tendini.

- Dispositivi a contatto diretto (si possono vedere degli esempi nella figura(1.3) in cui viene impiegato un fluido magnetoreologico¹ [17], nella

¹Questi materiali consistono di una sospensione di particelle di dimensioni micrometriche magnetizzabili immerse in un olio sintetico. L'esposizione ad un campo magnetico

Capitolo 1. Introduzione

figura(1.4) e nella figura(??) dove è mostrato il “CASR display” che costituisce la base di questa tesi):

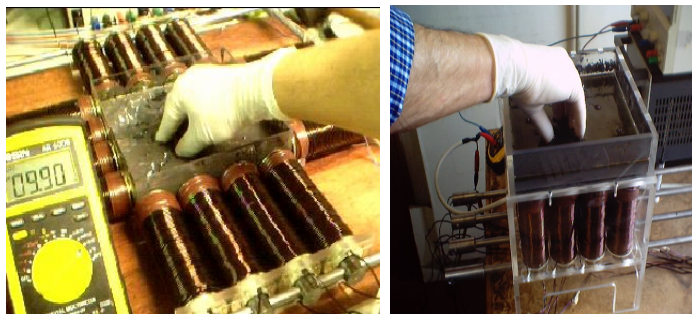


Figura 1.3: Sono mostrati due configurazioni di un dispositivo, realizzato presso il centro E. Piaggio” dell’Università di Pisa, che consente di percepire la forma degli oggetti grazie al’uso di un fluido magnetoreologico

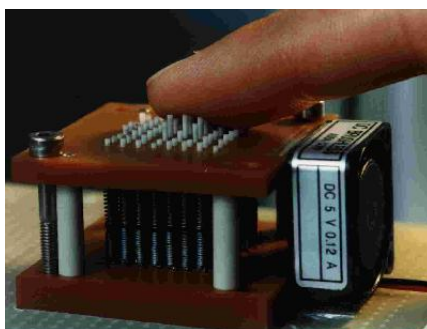


Figura 1.4: Stimolatore tattile costituito da una matrice di pistoncini

Questa seconda categoria di interfacce aptiche riproducono, più fedelmente, sensazioni come la ruvidità, la temperatura e la forma degli oggetti virtuali mediante stimolazione diretta del polpastrello dell’utente. In questa tesi l’attenzione è concentrata in particolare sulle sensazioni tattili legate alla variazione della superficie di contatto col variare della pressione esercitata sull’oggetto. Nel dito le informazioni cutanee si riferiscono alla distribuzione di pressione sia nello spazio che

esterno induce nel liquido un cambiamento nel comportamento reologico che lo trasforma in pochi millisecondi in uno stato semi solido. Appena viene rimosso il campo il fluido ritorna rapidamente in forma liquida.

nel tempo e sono mediate da meccanocettori presenti sia nel derma che nell'epidermide.

1.3 Interfacce “multi-contatto”

Le interfacce aptiche a più punti di contatto, insieme con la sintesi di forze e coppie, durante la simulazione di manipolazione e di manovre complesse con oggetti virtuali, possono portare miglioramenti significativi in diverse applicazioni come per esempio l'assemblaggio e il disassemblaggio nella prototipazione virtuale e la palpazione medica durante esami virtuali. I dispositivi commerciali presentano però diverse restrizioni alla simulazione dell'afferraggio a più punti di contatto sia in termini di workspace sia in termini di trasparenza limitando quindi lo sviluppo di applicazioni di haptic rendering che implicano l'interazione di più dita.

Lo studio del ruolo svolto dai due tipi di percezione, cinestetica e tattile, è un'importante argomento di ricerca che può condurre alla definizione di nuove tipologie di interfacce. Uno dei limiti delle interfacce cinestetiche attuali è, infatti, la mancanza di sensazione aptica al livello del polpastrello mentre ricerche recenti hanno mostrato come l'elaborazione locale delle informazioni aptiche sia fondamentale nell'esecuzione di diversi compiti come il riconoscimento di forme o la manipolazione. Questi importanti fattori spiegano gli attuali orientamenti, della ricerca e dello sviluppo tecnologico nel campo dei dispositivi aptici, e il crescente utilizzo di sistemi multimodali (integrazione di sistemi cinestetici e tattili) a più punti di contatto.

1.4 Fasi dello studio

Lo studio che ha condotto alla progettazione e alla realizzazione del dispositivo multi-finger si è articolato nelle seguenti fasi di analisi e sviluppo:

- studio ed analisi dei principi di funzionamento del “CASR”, dispositivo base ai fini della realizzazione dell'hardware finale “multi-contatto”;

Capitolo 1. Introduzione

- studio teorico e analitico del “CASR display” presentato nel capitolo (2);
- integrazione di precisione cutanea e cinestetica analizzato nel capitolo (3);
- progettazione e realizzazione del dispositivo finale “multi-dito” presentato brevemente nel capitolo (4);
- progettazione e realizzazione dell’elettronica di attuazione del dispositivo;
- progettazione del controllo per il dispositivo “multi-dito”.

Nella prima fase si è studiato lo stato dell’arte relativo al dispositivo CASR e agli altri sistemi di stimolazione tattile al momento disponibili. Si è studiato il CASR considerando, sia l’aspetto realizzativo sia quello relativo alle prove di funzionamento e di verifica della rispondenza alle ipotesi fatte.

Nella seconda fase sono state determinate le relazioni geometriche che descrivono il funzionamento del CASR display. È stata utilizzata la teoria di Hertz per rappresentare matematicamente i materiali reali e si è sviluppato un primo controllo che ha permesso di simulare la superficie di contatto.

Nella terza fase per far fronte agli evidenti limiti del CASR è stato introdotto un nuovo dispositivo di tipo prettamente cinestetico. Una volta individuate le caratteristiche di funzionamento del Delta si è proceduto alla realizzazione del controllo utilizzando i due dispositivi in serie.

Dalle fasi precedenti si è ottenuto un dispositivo in grado di simulare diversi oggetti ma con il limite di offrire all’utente un solo punto di contatto. Questo, è il motivo per cui, nella fase conclusiva di questo lavoro, si è arrivati alla progettazione e alla realizzazione di un dispositivo multi-finger.

Capitolo 2

Studio analitico del CASR display

2.1 Introduzione

In questo capitolo, dopo una breve descrizione del CASR display e del principio di funzionamento è stata eseguita l'analisi geometrica e funzionale del display, con l'obiettivo di realizzare un controllo che permetta di stimolare la percezione tattile in modo naturale.

2.2 Il CASR display

Questo studio ha come elemento base un dispositivo di tipo cutaneo, che ha come scopo quello di riprodurre l'area di contatto tra dito ed oggetto durante la manipolazione. Il dispositivo in questione è il "CASR display" acronimo per "Contact Area Spread Rate" figura(2.1): esso è un attuatore aptico ideato e realizzato presso il Centro Interdipartimentale di Ricerca "E. Piaggio" dell'Università di Pisa [1].

Più precisamente si ipotizza che la maggior parte delle informazioni tattili necessarie per discriminare la morbidezza degli oggetti tramite il tatto è contenuta nella legge che lega la forza risultante dal contatto con l'area di contatto, o meglio al rapporto con cui l'area di contatto aumenta sul dito man mano che questo viene premuto sempre con più forza sull'oggetto. È importante notare che quanto detto non implica che tutte le altre infor-



Figura 2.1: CASR display

mazioni tattili siano poco rilevanti ma, piuttosto lascia intendere che in caso di scarse informazioni quelle legate all'area di contatto rappresentano in modo più che soddisfacente il senso del tatto. A conferma di questa ipotesi è stata introdotta la teoria standard di *Hertz* del contatto tra due corpi elastici, omogenei ed isotropi. Infatti applicando questa teoria al contatto tra un dito, con dati valori geometrici ed elastici E_1, ν_1, R_1 , e 6 oggetti con stesso coefficiente di *poisson* ν_2 e stesso raggio R_2 ma diversi moduli di *Young* si ottiene una caratteristica Forza/Area come quella mostrata in figura(2.2). Mentre in figura(2.3) è mostrato il grafico Forza/Area relativo al contatto tra un dito, con gli stessi parametri dati nel caso precedente, e 6 oggetti con stesse caratteristiche elastiche ma forma diversa.

2.3 Descrizione del CASR display

Il CASR display è un attuatore aptico di tipo pneumatico. È costituito da:

- una camera, in cui viene controllata la pressione mediante un'elettrovalvola;

2.3 Descrizione del CASR display

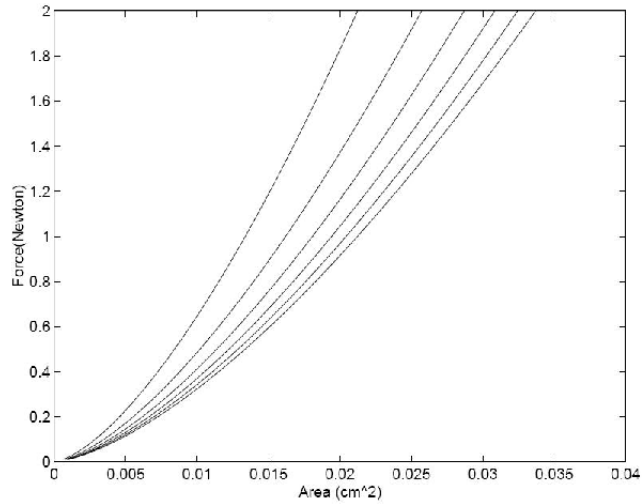


Figura 2.2: Curve forza/area secondo il modello hertziano del contatto fra un dito, considerato sferico, con $E_1 = 0,25\text{Mpa}$; $\nu_1 = 0,5$; $R_1 = 5\text{mm}$, e sei oggetti con $\nu_2 = 0,5$; $R_2 = 10\text{mm}$; e E_2 che varia linearmente tra $E_1/2$ e $2E_1$.

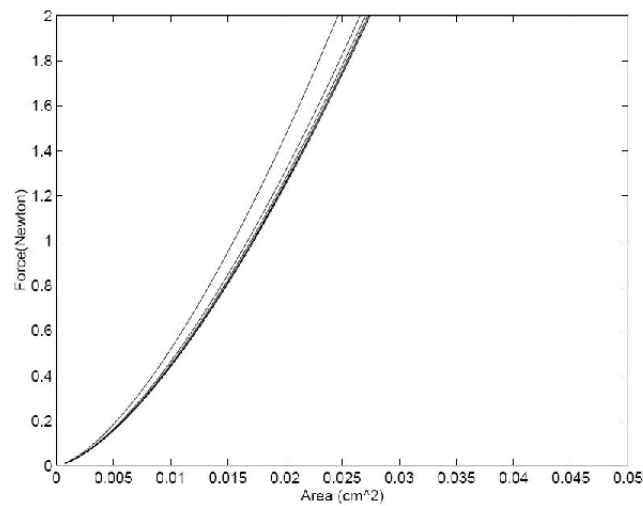


Figura 2.3: Curve forza/area secondo il modello hertziano del contatto fra un dito come sopra definito e sei oggetti con $\nu_2 = 0,5$; $E_2 = 0,125\text{MPa}$; e R_2 che varia linearmente tra $5R_1$ e $50R_1$.

Capitolo 2. Studio analitico del CASR display

- una serie di cilindretti coassiali capaci di scorrere l'uno dentro l'altro in modo telescopico come mostrato in Figura(2.4).

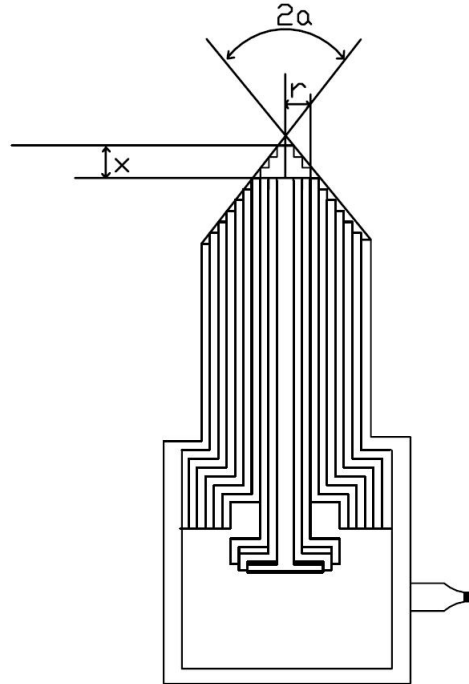


Figura 2.4: Schema di funzionamento del casr display

Questo movimento consente ai cilindretti di adattarsi alla superficie dei polpastrelli delle dita variando di conseguenza l'area di contatto tra dito e dispositivo. Quando su i cilindretti non viene applicata alcuna forza dall'operatore, questi si dispongono, sotto l'azione dell'area compressa, in una configurazione che approssima una forma conica. Quando, invece, l'operatore applica una forza i cilindretti variano la loro posizione rispetto alla configurazione di riposo e si dispongono in una nuova configurazione di equilibrio tra la forza applicata dal dito e quella applicata dalla pressione controllata mediante l'elettrovalvola. La posizione assunta dai cilindretti viene letta mediante un sensore di posizione di tipo ottico.

In base alle ipotesi appena fatte il principio di funzionamento su cui si basa, il CASR trae origine dall'osservazione che durante la manipolazione degli oggetti, l'area di contatto tra il polpastrello delle dita e l'oggetto au-

2.4 Analisi geometrica del “CASR display”

menta secondo una legge governata sia dalla cedevolezza del materiale che dall'entità del carico applicato. Cioè, a seconda del materiale di cui è fatto l'oggetto, e della forza impiegata nell'afferrarlo, si ottengono aree di contatto differenti. Quindi al fine di utilizzare il CASR display per simulare il comportamento di un particolare materiale è stato necessario determinare delle relazioni matematiche tra la forza, l'area di contatto, la pressione e l'abbassamento dei cilindretti del dispositivo in modo da conoscerne adeguatamente il comportamento.

2.4 Analisi geometrica del “CASR display”

Iniziamo l'analisi dalla definizione geometrica del CASR display. A tal proposito si consideri la figura(2.4). È evidente che il CASR è costituito da un numero finito di cilindretti che quindi introdurranno una certa discretizzazione nella variazione della superficie di contatto. Questo ha come conseguenza, imponendo una pressione costante, l'effetto di produrre una variazione a gradino della forza percepita dal soggetto. Infatti, man mano che il dito trasla lungo l'asse del CASR entra in contatto con nuovi cilindretti che producono ciascuno un determinato incremento ΔA_i di superficie. Quindi secondo la nota formula $F = P \cdot A$ si ottiene una relazione come quella che segue

$$F = P \cdot \left(A + \sum_{i=0}^n \Delta A_i \right). \quad (2.1)$$

Dove A è la superficie del cilindretto centrale che è il primo cilindretto con il quale si entra in contatto. Pertanto, fissata la pressione, al variare della superficie si avrà una variazione della forza che agisce contro il dito come mostrato in Figura(2.5).

Nel nostro studio tuttavia verranno introdotte le seguenti ipotesi semplificative:

1. Il CASR display è assimilabile ad un cono che soggetto ad un carico assiale varia con continuità la sua altezza e la corrispondente deformazione;

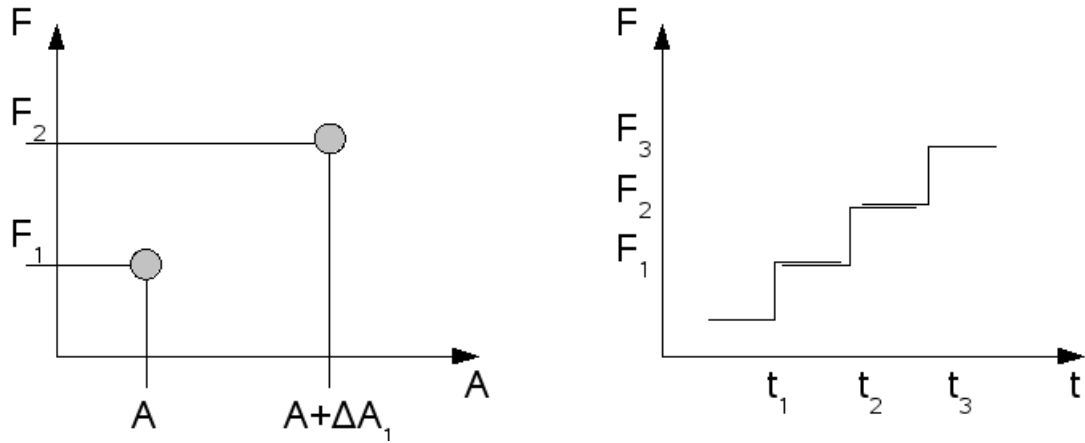


Figura 2.5: Caratteristiche forza-area e forza tempo del CASR. Nel grafico di destra i t_i rappresentano gli istanti in cui il dito entra in contatto con un nuovo cilindretto.

2. La superficie di contatto e la forza variano con continuità;

La rappresentazione geometrica che ne risulta può essere vista in figura(2.6). Dove i simboli indicati in figura hanno il seguente significato: α rappresenta l'angolo di apertura del cono definito in fase di progettazione, δ_c l'escursione assiale dovuta all'azione del dito, r il raggio della superficie di contatto, H l'altezza totale del cono, R il raggio del cono, F_c la forza applicata dal dito, P_{int} la pressione gestita mediante un'elettrovalvola, P la pressione tra il dito e la superficie superiore dei cilindretti.

Le relazioni geometriche e fisiche che descrivono il dispositivo sono le seguenti

$$A_c = \pi \cdot r^2 \quad (2.2)$$

ma r è dato da

$$r = \delta_c \cdot tg\alpha \quad (2.3)$$

dove $tg\alpha$ può essere scritto anche come

$$tg\alpha = \frac{R}{H} \quad (2.4)$$

2.4 Analisi geometrica del “CASR display”

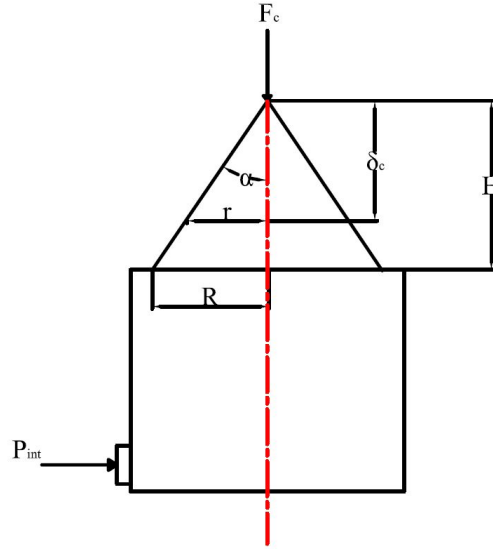


Figura 2.6: Rappresentazione approssimata del CASR. I cilindretti vengono sostituiti con un cono che varia con continuità la superficie di contatto con il dito.

quindi la superficie di contatto A_c in funzione di δ_c può essere scritta come

$$A_c(\delta_c) = \pi \delta_c^2 t g^2 \alpha = C \cdot \delta_c^2 \quad (2.5)$$

dove è stato posto $C = \pi \cdot t g^2 \alpha$. La forza in funzione di δ_c è data da

$$F_c(\delta_c) = P \cdot A = P \pi \delta_c^2 t g^2 \alpha = C \cdot P \cdot \delta_c^2 \quad (2.6)$$

La relazione (2.6) è confermata da una analisi sperimentale che ha mostrato che la caratteristica Forza/Area parametrizzata rispetto alla pressione ha un andamento pressoché lineare come si può vedere in figura(2.7).

A questo punto è anche possibile esprimere l'area di contatto e il δ_c in funzione della forza applicata sul casr

$$A_c(F_c) = \frac{F_c}{P} \quad (2.7)$$

Capitolo 2. Studio analitico del CASR display

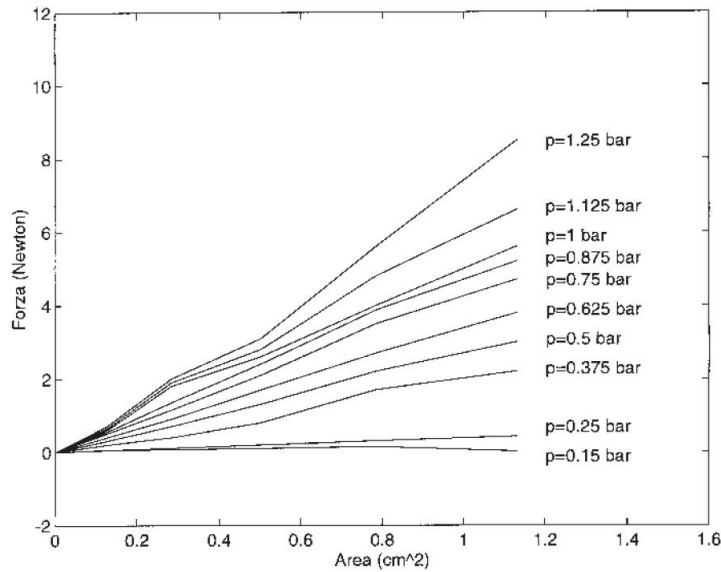


Figura 2.7: Caratteristica forza/area ottenuta con il CASR e parametrizzata rispetto alla pressione

$$\delta_c(F_c) = \left(\frac{F_c}{C \cdot P} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.8)$$

Un aspetto importante da osservare è che la pressione P e la superficie A_c che compaiono nelle relazioni sopra riportate sono quelle relative al contatto tra il dito e la parte superiore del cono del CASR, mentre la pressione su cui si può agire per controllare il sistema è quella che agisce all'interno del CASR e che nella figura(2.6) è stata indicata con P_{int} .

Per la forma dei cilindretti, vedi figura(2.4), la superficie A_c è diversa dalla superficie $A_{c_{int}}$, ma dovendo avere all'equilibrio $F_c = F_{c_{int}}$ risulta che le due pressioni sono generalmente diverse, di ciò è necessario tener conto quando nel sistema di controllo si andrà a pilotare la valvola.

Per comprendere meglio quanto detto sin ora si osservi la figura(2.8) dove si ha sul lato esterno

$$F = P \cdot A \quad (2.9)$$

mentre sulla superficie interna

2.4 Analisi geometrica del “CASR display”

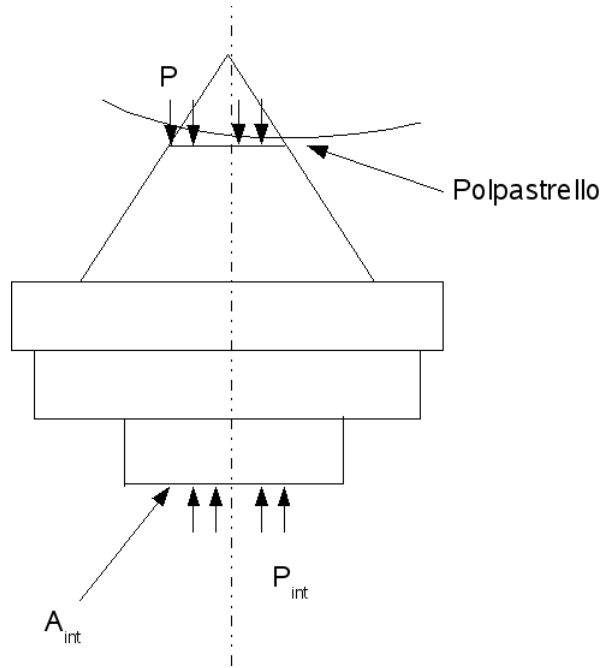


Figura 2.8: Equilibrio tra P e P_{int}

$$F_{int} = P_{int} \cdot A_{int} \quad (2.10)$$

e per l'equilibrio si ha

$$P \cdot A = P_{int} \cdot A_{int} \implies P_{int} = P \cdot \frac{A}{A_{int}} \quad (2.11)$$

Per vedere la relazione che intercorre tra la A e la A_{int} si può fare riferimento alla figura(2.9) dove man mano che, con il dito, si premono i vari cilindretti si può idealmente osservare come la superficie inferiore dei cilindretti definisce un cono con un angolo di apertura $\alpha_{int} \neq \alpha$ ma con $H_{int} = H$ e $\delta_{int} = \delta_c$. Le relazioni che definiscono il comportamento “interno” del CASR sono le seguenti

$$r_{int} = \delta_{int} \operatorname{tg} \alpha_{int} \quad (2.12)$$

dove

$$\operatorname{tg} \alpha_{int} = \frac{R_{int}}{H_{int}} \quad (2.13)$$

poichè come si è detto risulta che: $\delta_{cint} = \delta_c$ e $H_{int} = H$ la A_{int} può essere

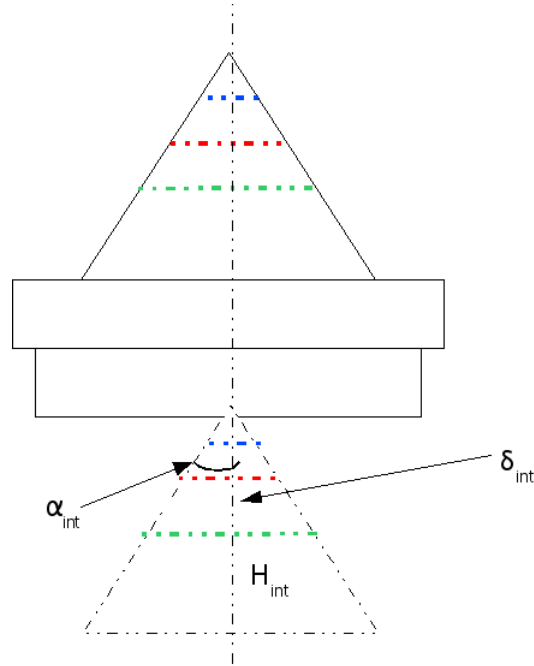


Figura 2.9: Cono immaginario descritto dalle superfici inferiori dei cilindretti al crescere del δ_c

scritta come

$$A_{int} = \pi r_{int}^2 = \pi \delta_{int}^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{int} = \pi \delta_{int}^2 \left(\frac{R_{int}}{H} \right)^2 \quad (2.14)$$

facendo il rapporto tra le due superfici e semplificando si ha

$$\frac{A}{A_{int}} = \pi \delta_c^2 \frac{R^2}{H^2} \cdot \frac{H^2}{R_{int}^2} \frac{1}{\pi \delta_c^2} = \frac{R^2}{R_{int}^2} \quad (2.15)$$

pertanto sostituendo nella (2.11) si ha

$$P_{int} = P \left(\frac{R}{R_{int}} \right)^2. \quad (2.16)$$

Definita la geometria del CASR e le principali relazioni matematiche che ne governano la fisica, si può passare a caratterizzare i materiali. Si ricordi, infatti, che lo scopo di questo studio è quello di riprodurre in un ambiente

virtuale, le sensazioni tattili che si hanno toccando i diversi oggetti con i quali si entra in contatto.

2.5 Caratterizzazione del materiale

Per la caratterizzazione dei materiali reali si è fatto ricorso, come già accennato in precedenza in questo stesso capitolo, alla teoria del contatto, stabilita da Hertz nel 1881 che predice l'aumento dell'area di contatto in funzione del carico applicato e della cedevolezza dei corpi interagenti [13], [4].

Due corpi con superfici a diversa curvatura hanno idealmente un solo punto o una linea di contatto. Per effetto del carico esterno il punto o la linea si espandono sino a diventare piccole aree (vedi figura(2.10)).

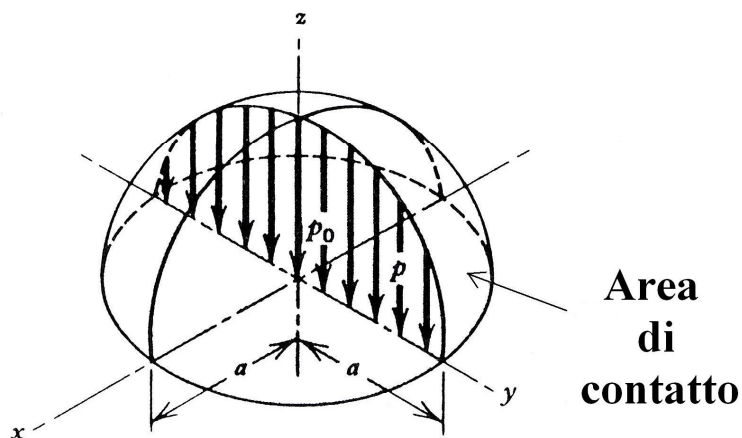
L'analisi di Hertz, valida per contatto teoricamente puntiforme o lineare, parte dalle seguenti ipotesi

- solidi omogenei ed isotropi;
- deformazioni elastiche e contenute entro i limiti di elasticità lineare (è valida la legge di Hooke¹);
- le dimensioni dell'area di contatto sono piccole rispetto al raggio di curvatura dei corpi a contatto;
- i raggi di curvatura della zona di contatto sono anch'essi grandi, se confrontati con le dimensioni dell'area di contatto;
- fra i due corpi non vi sono forze di attrito radente e quindi durante il contatto agisce solo la forza normale;
- le superfici a contatto sono continue, e possono essere rappresentate da polinomi del secondo ordine prima della deformazione.

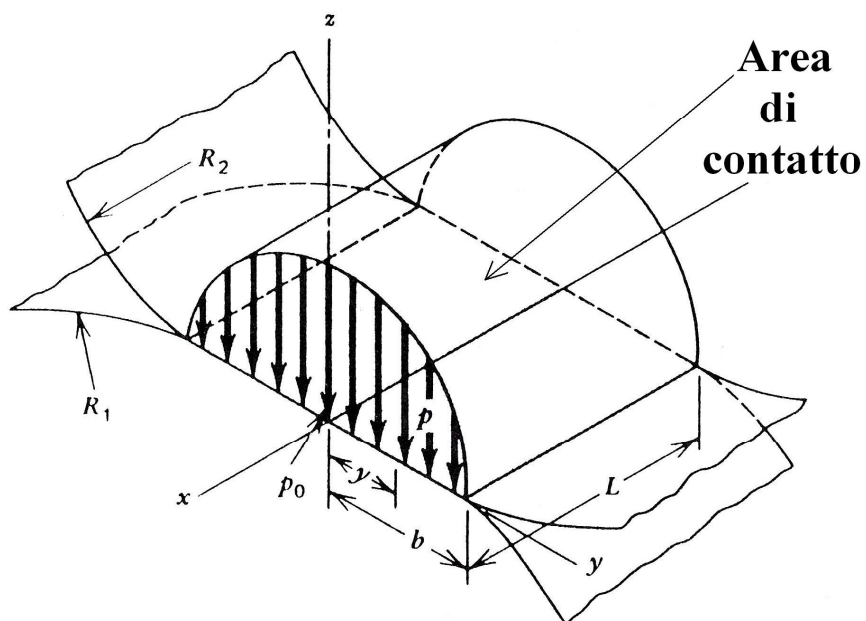
La teoria di Hertz porta alla descrizione della forma della zona di contatto secondo una superficie del secondo ordine (ellissoide di rivoluzione), di equazione

$$Z = Ax^2 + By^2 + Cxy \quad (2.17)$$

¹La legge di Hooke $F = -k \cdot x$.



(a)
Due sfere



(b)
Due cilindri paralleli

Figura 2.10: Superfici di contatto secondo la teoria di Hertz nel caso: (a)Due sfere, (b)Due cilindri.

2.5 Caratterizzazione del materiale

Le costanti A e B sono definite da una serie di equazioni complesse che dipendono dai raggi di curvatura dei due corpi e che permettono anche di ricavare i semiassi dell'ellisse a e b che rappresenta l'area deformata.

La teoria hertziana giunge poi alla formulazione della legge di distribuzione delle pressioni nella zona di contatto con la relazione

$$P = P_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (2.18)$$

$$P_{max} = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (2.19)$$

Le pressioni, nei vari punti dell'area deformata di contatto, hanno quindi una distribuzione semiellissoidale.

Si possono considerare due casi particolari

1. Sfera su sfera figura(2.10 (a)) (dove d_1 e d_2 sono i raggi delle due sfere).
L'area di contatto è una circonferenza di raggio

$$a = \sqrt[3]{\frac{3P}{8} \cdot \frac{(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2}{\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}} \quad (2.20)$$

in questo caso la pressione massima di contatto è data da

$$P_{max} = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (2.21)$$

2. Cilindro su cilindro figura(2.10 (b))(dove d_1 e d_2 sono i raggi dei due cilindri) di lunghezza L. L'area di contatto è un rettangolo di semi-larghezza

$$b = \sqrt[3]{\frac{2P}{\pi L} \cdot \frac{(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2}{\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}} \quad (2.22)$$

in questo caso la pressione massima di contatto è data da

$$P_{max} = \frac{2P}{\pi bL} \quad (2.23)$$

Capitolo 2. Studio analitico del CASR display

In questa sede viene considerato il caso più semplice trattato dalla teoria di Hertz e cioè quello dei solidi di rivoluzione. L'area di contatto in questo caso è di forma circolare, avente raggio a e l'equazione che descrive gli spostamenti dei punti dei due oggetti interagenti all'interno dell'area di contatto è

$$\bar{u}_{z1} + \bar{u}_{z2} = \delta - \frac{r^2}{2R} \quad (2.24)$$

dove $\delta = \delta_1 + \delta_2$ è lo spostamento relativo dei due corpi, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ è la curvatura relativa, r è la distanza radiale dall'origine ($r \leq a$) (vedi figura(2.11)).

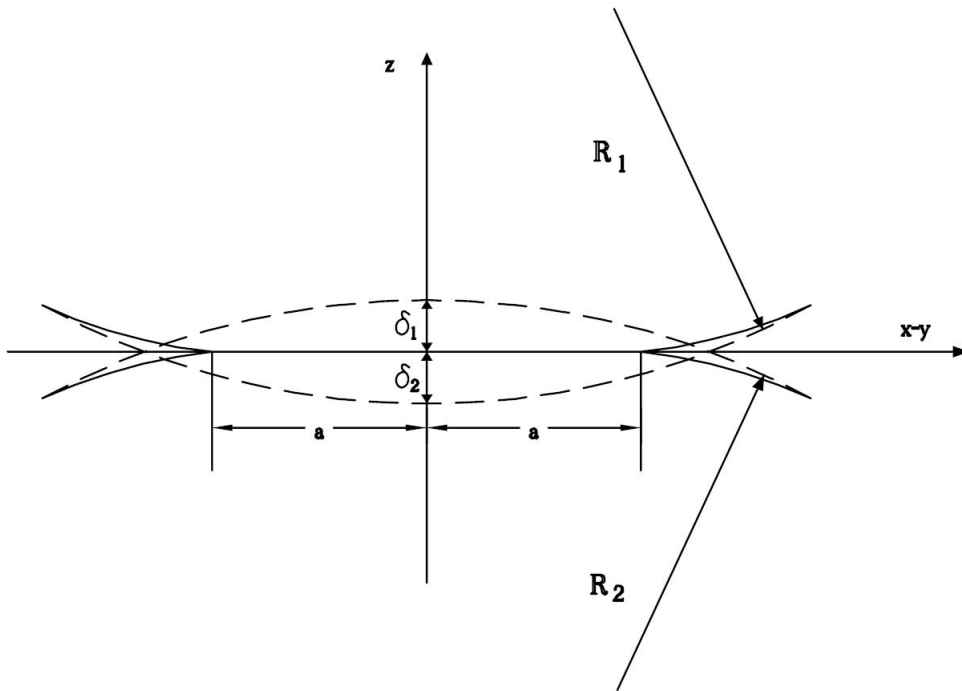


Figura 2.11: Schema del contatto Hertziano tra due superfici curve.

La distribuzione della pressione nella regione di contatto proposta da Hertz è

$$p(r) = p_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

2.5 Caratterizzazione del materiale

e lo spostamento normale è dato da

$$\bar{u}_z = \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot \frac{\pi p_0}{4a} \cdot (2a^2 - r^2); r \leq a. \quad (2.26)$$

Riscrivendo lo spostamento per \bar{u}_{z1} e \bar{u}_{z2} e sostituendolo nell'equazione(2.24) si ha

$$\frac{\pi p_0}{4aE^*} = \delta - \frac{r^2}{2R} \quad (2.27)$$

dove

- $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$, E_i è *Modulo di Young* del corpo i-esimo;
- $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, R_i è il raggio di curvatura del corpo i-esimo.

Dall'equazione (2.27) si può ricavare il raggio della regione circolare di contatto

$$a = \frac{\pi p_0 R}{2E^*} \quad (2.28)$$

la distanza relative tra i punti dei due corpi è data da

$$\delta = \frac{\pi a p_0}{2E^*} \quad (2.29)$$

la forza totale di compressione è legata alla pressione dalla seguente espressione

$$F = \int_0^a p(r) 2\pi r dr = \frac{2}{3} p_0 \pi a^2 \quad (2.30)$$

Riscrivendo l'equazione (2.28) nel seguente modo

$$\pi \cdot P_0 = \frac{2E^*}{R} \cdot a \quad (2.31)$$

e sostituendola nella (2.30) si ottiene

$$F = \frac{4}{3} \cdot \frac{E^*}{R} \cdot a^3 \quad (2.32)$$

dalla relazione appena scritta si può ricavare il raggio a , della regione di contatto hertziano, in funzione della forza F con cui gli oggetti sono premuti

Capitolo 2. Studio analitico del CASR display

l'uno contro l'altro:

$$a(F) = \left(\frac{3FR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.33)$$

da cui l'area di contatto tra i corpi, in funzione della forza F , è ottenuta come

$$A = \pi a^2 = \pi \left(\frac{3FR}{4E^*} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (2.34)$$

Pertanto la forza in funzione dell'area di contatto è data da

$$F = \left(\frac{4E^*}{3R} \right) \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{3}{2}} A^{\frac{3}{2}}. \quad (2.35)$$

La caratteristica Forza/Area, in questo caso, è risultata avere l'andamento mostrato in figura(2.2).

Sostituendo l'equazione (2.31) nella relazione (2.29) si ottiene

$$\delta = \frac{a^2}{R} \quad (2.36)$$

che permette di scrivere a in funzione di δ

$$a(\delta) = (R \cdot \delta)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.37)$$

Sostituendo la (2.33) nella (2.36) si ha δ in funzione della forza F

$$\delta(F) = \frac{1}{R} \left(\frac{3FR}{4E^*} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.38)$$

dalla quale, con semplici passaggi matematici è possibile ottenere l'espressione della forza in funzione del δ

$$F(\delta) = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}}. \quad (2.39)$$

In fine si può anche ricavare la superficie di contatto in funzione del δ sostituendo la (2.37) nella (2.34)

$$A(\delta) = \pi R \delta. \quad (2.40)$$

2.6 Simulazione con il “CASR display” degli oggetti reali

Se un corpo, ad esempio il corpo 2, è piano e rigido, allora si ha

$$R_2 \longrightarrow \infty \quad E_2 \longrightarrow \infty$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1}$$

e tutte le espressioni si semplificano.

2.6 Simulazione con il “CASR display” degli oggetti reali

Affinché si possa simulare la sensazione tattile è necessario che le due caratteristiche, del CASR e del materiale, siano uguali. In pratica si desidera che siano verificate le seguenti condizioni:

1. $A_m = A_c$
2. $\delta_m = \delta_c$
3. $F_m = F_c$

L’obbiettivo è quello di ottenere, quando si applica con il dito la stessa forza F sia su di un oggetto reale che sul CASR, la stessa escursione assiale δ e la stessa superficie di contatto con il polpastrello. Però, si nota subito che delle 3 condizioni sopra esposte solo 2 sono quelle su cui possiamo agire con un sistema di controllo. Questo perché A_c e δ_c sono legate da un vincolo di tipo geometrico descritto dalla (2.5) che quindi una volta fissato, in sede di progettazione, non può più essere cambiato. Il risultato di questo vincolo geometrico è quello di produrre, durante la simulazione della manipolazione di un oggetto, ad esempio una diversità tra δ_m e δ_c anche quando si ha la stessa area di contatto. Cioè, non è possibile imporre contemporaneamente l’uguaglianza fra area di contatto e deformazione. Tuttavia è stato già chiarito nel paragrafo(2.2) che la maggior parte delle informazioni tattili sono contenute nella legge che lega la forza applicata all’area di contatto. Quindi

Capitolo 2. Studio analitico del CASR display

nel tentativo di simulare l'oggetto è sicuramente più importante poter replicare l'area di contatto che non la deformazione δ . Risulta di conseguenza che dalle 3 condizioni su menzionate si desidera realizzare le seguenti condizioni:

$$\begin{aligned}A_m &= A_c = A \\ F_m &= F_c = F.\end{aligned}\tag{2.41}$$

Alternativamente con lo stesso sistema è possibile realizzare anche le condizioni:

$$\begin{aligned}\delta_m &= \delta_c = \delta \\ F_m &= F_c = F.\end{aligned}\tag{2.42}$$

Prima di parlare nel dettaglio del controllo eseguito, nel prossimo paragrafo sarà descritto brevemente e solo nelle sue parti essenziali il sistema di gestione del CASR display.

2.7 Descrizione del sistema di gestione del CASR display

Il sistema di gestione e controllo del dispositivo, schematizzato in figura(2.12), è costituito da:

- un CASR display dotato di un sensore di posizione ad effetto *Hall* e di un magnete permanente montato sulla parte inferiore del perno centrale;
- un box contenente l'elettronica e l'elettrovalvola;
- un compressore;
- un PC equipaggiato con:
 - il software utilizzato nel controllo per motivi di comodità è stato

2.7 Descrizione del sistema di gestione del CASR display

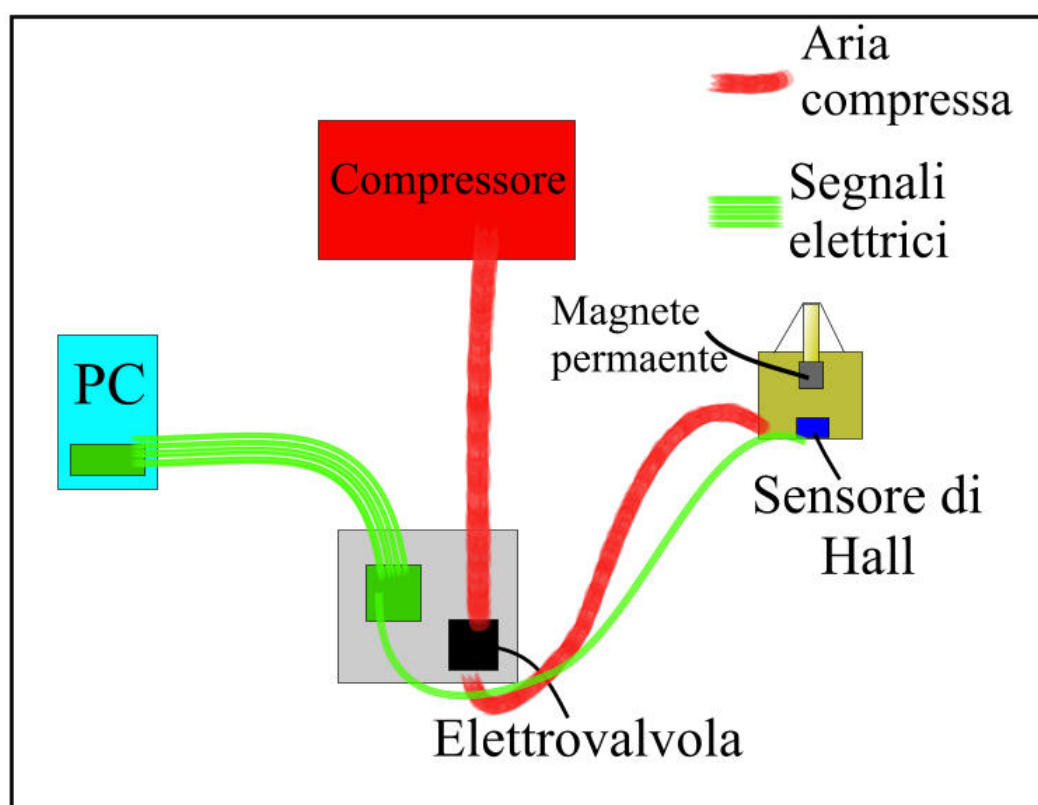


Figura 2.12: Schema semplificato del sistema di gestione del CASR display

Capitolo 2. Studio analitico del CASR display

realizzato in Matlab della MatWorks Inc, e in particolare è stato utilizzato Simulink per la gestione del dispositivo;

- una scheda di acquisizione *PCI6024E* della National Instruments. Questa scheda è dotata di 8 canali di ingresso e 2 d’uscita. Quindi si adatta bene a questo sistema che richiede solo un canale di ingresso per leggere il sensore di posizione e solo un canale d’uscita per comandare l’elettrovalvola

Il funzionamento del sistema appena descritto può essere riassunto in pochi passi: quando viene applicata una forza sul CASR, esso si deforma e la nuova posizione viene letta direttamente dal sensore di *Hall* che, tramite la scheda del PC e mediante un opportuno sistema di controllo viene stabilito il valore di pressione che, la scheda *PCI6024E* deve realizzare aprendo e chiudendo opportunamente l’elettrovalvola la quale, quindi, invia il flusso d’aria adeguatamente tarato alla camera del CASR per riprodurre la sensazione tattile desiderata.

2.8 Controllo del CASR display

La tecnica di controllo impiegata è quella dell’inseguimento di riferimento rappresentato dall’andamento della curva Forza/Area del materiale reale. In pratica vengono confrontate due curve Forza/Area: la prima costituisce il riferimento desiderato del sistema ed è ricavata dalla teoria *hertziana* o da un andamento sperimentale. La seconda esprime direttamente il modello analitico del CASR display descritto dalla relazione(2.6). Uno schema elementare rappresentativo del principio di controllo è mostrato in figura (2.13).

2.8.1 Controllo Inseguimento di Forza/Area

In questo primo controllo si cerca di realizzare la condizione(2.41). A questo proposito si ricordano le due relazioni (2.6) e (2.35) che esprimono la forza in funzione della superficie rispettivamente per il CASR display in base alle re-

2.8.1 Controllo Inseguimento di Forza/Area

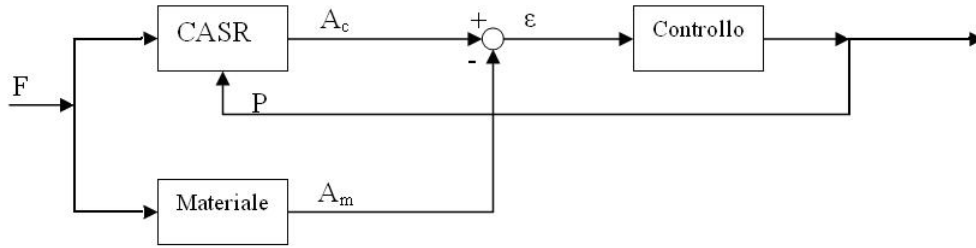


Figura 2.13: Schema di controllo a blocchi generale del CASR display.

lazioni analitiche e per un oggetto reale secondo la teoria di Hertz. Uguagliando le due espressioni della forza e ponendo $A_m = A_c$ si ha:

$$\left(\frac{4E^*}{3R}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} A_m^{\frac{3}{2}} = P \cdot A \quad (2.43)$$

riordinando e ponendo

$$n = \left(\frac{4E^*}{3R}\right) \left(\frac{1}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.44)$$

otteniamo

$$P = n\sqrt{A} \quad (2.45)$$

Nel sistema di controllo si potrà leggere la A grazie al sensore ad effetto *Hall*, che misura la δ_c ad ogni istante, e alla (2.5) che lega la δ_c alla A in modo geometrico.

Ricordando quanto detto nel paragrafo(2.4) dalla relazione(2.16) si ha:

$$P = P_{int} \left(\frac{R_{int}}{R}\right)^2 \quad (2.46)$$

che sostituita nella relazione(2.45) da la seguente relazione:

$$P_{int} = n\sqrt{A} \left(\frac{R}{R_{int}}\right)^2 \quad (2.47)$$

che è l'espressione della pressione interna, la quale controllata mediante l'elettrovalvola, consente di riprodurre la giusta pressione e superficie di contatto con il polpastrello. Quindi, controllando la pressione all'interno del CASR,

Capitolo 2. Studio analitico del CASR display

si può ottenere la stessa caratteristica Forza/Area che si ottiene toccando un oggetto reale e applicando la teoria di *Hertz*.

A questo punto è possibile, facendo riferimento alla figura(2.14), descrivere nel dettaglio il controllo sviluppato. Si parte dal blocco in alto a sinistra

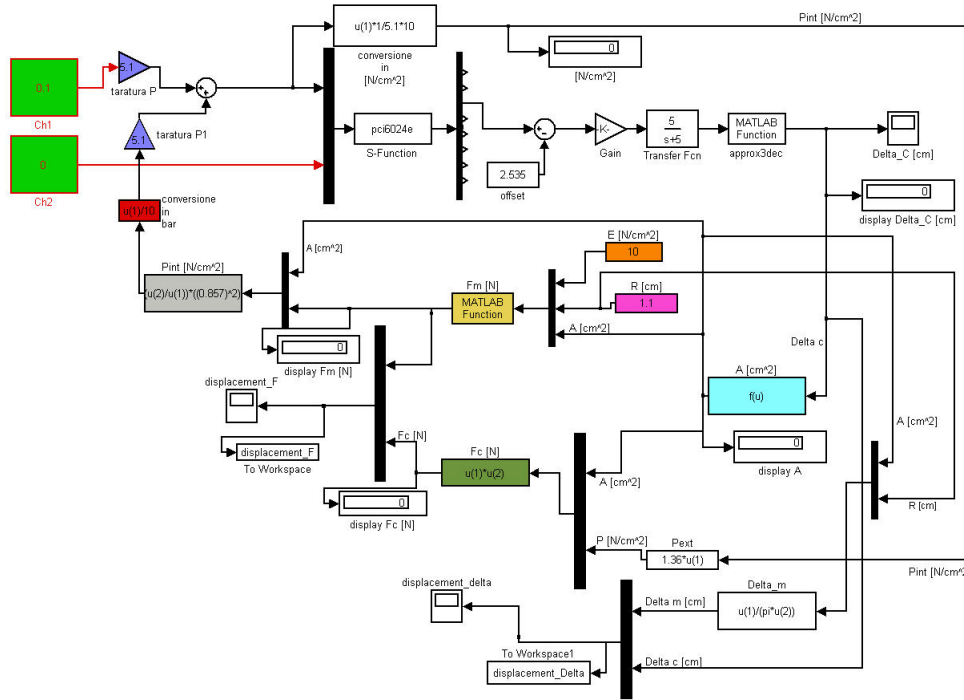


Figura 2.14: Schema a blocchi dettagliato del controllo “Inseguimento di Forza/Area” del CASR display, eseguito con Simulink, nel caso di inseguimento della curva Forza/Area data dalla teoria Hertziana.

dove viene impostata la pressione P_0 necessaria ad attuare il CASR. Il valore di riferimento utilizzato come sorgente rappresenta la pressione in bar che in condizioni di riposo si ha in uscita dall’elettrovalvola. Questa corrispondenza è resa possibile grazie al blocco di taratura della pressione rappresentato nello schema. Il valore di pressione corretto viene inviato alla scheda d’acquisizione che quindi provvede ad inviarlo all’elettrovalvola e quindi al CASR display. La scheda legge dal campo magnetico indotto la posizione dei cilindretti del CASR display tramite il sensore di *Hall* e tale segnale viene elaborato in modo da restituire il valore effettivo della posizione in *cm*. La misura della posizione viene inviata al blocco successivo dove viene calcolata la superficie

2.8.1 Controllo Inseguimento di Forza/Area

impiegata per il calcolo delle forze F_m e F_c con le relazioni (2.35) e (2.6). In questo modo si impone che $A_m = A_c$ ossia l'uguaglianza della superficie di contatto e lasciamo incerta la corrispondenza delle deformazioni assiali. La forza F_m e la superficie A vengono processati, quindi, da un opportuno blocco per ottenere la condizione $F_m = F_c$. Si ottiene così il valore della pressione espresso in $[\frac{N}{cm^2}]$ da inviare in retroazione all'elettrovalvola per l'inseguimento del riferimento. I risultati sperimentali che si ottengono con questo controllo sono mostrati nelle figure(2.15), (2.16). Dalle figure appare evidente, come ci si aspettava, che imponendo le due condizioni $F_m = F_c$ e $A_m = A_c$ si ha un buon inseguimento in termini di forze mentre la corrispondenza tra le deformazioni non è, in un certo senso, controllabile (vedi paragrafo(2.6)).

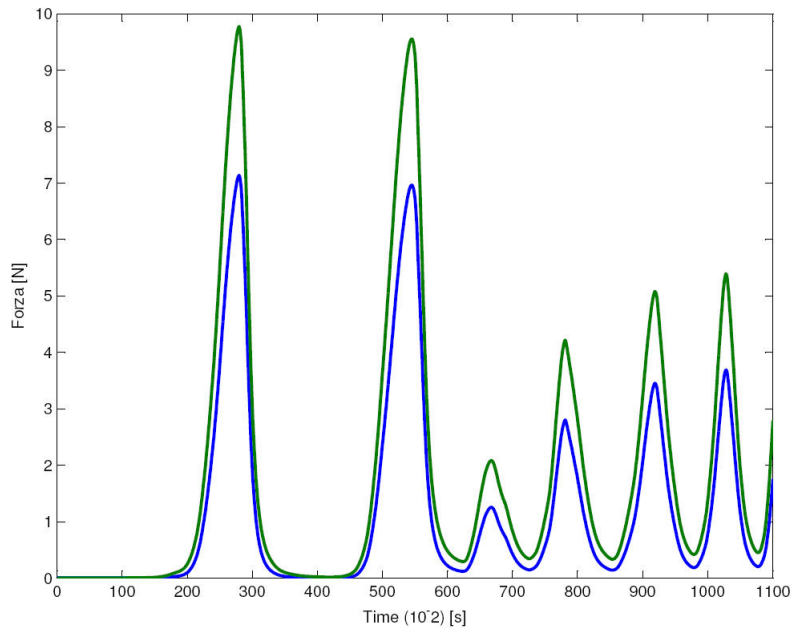


Figura 2.15: Curva di inseguimento tra la forza del CASR e quella di riferimento.

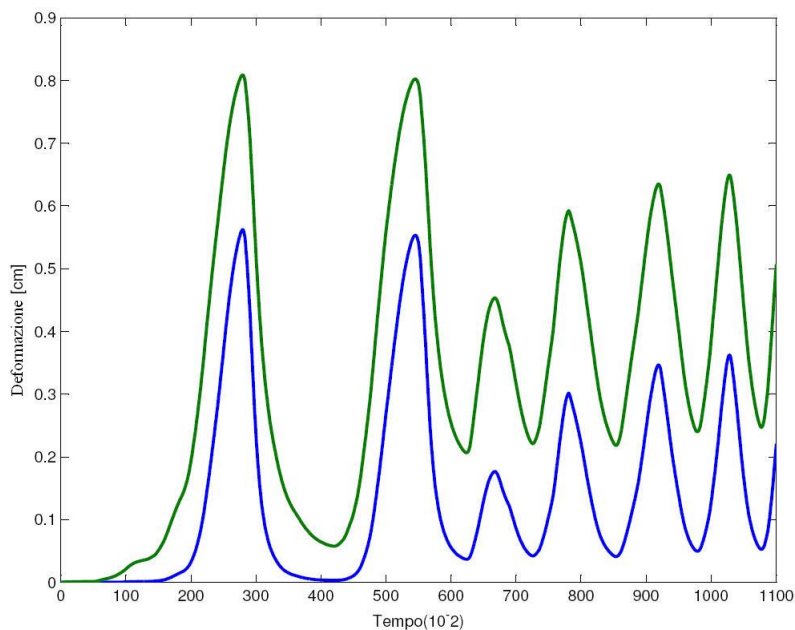


Figura 2.16: Displacement tra la deformazione del CASR e quella di riferimento.

2.8.2 Controllo Inseguimento di Forza/Posizione

In questa seconda tipologia di controllo, facendo riferimento alla figura(2.17) si cerca di realizzare la condizione (2.42), ossia anzichè imporre l'uguaglianza dell'area di contatto si impone l'uguaglianza delle escursioni. In pratica in questo caso lo spostamento letto dal sensore di Hall viene impiegato per calcolare separatamente le due aree A_m ed A_c rispettivamente secondo le relazioni (2.40) e (2.5), il che equivale a porre $\delta_m = \delta_c$. Per quanto riguarda il resto del sistema di controllo si procede in modo analogo al caso precedente. I risultati sperimentali che si ottengono in questo controllo sono mostrati nelle figure(2.18), (2.19). In questo caso a differenza di ciò che accadeva in quello precedente si ha corrispondenza tra le escursioni e tra le forze ma non tra le superfici.

2.8.2 Controllo Inseguimento di Forza/Posizione

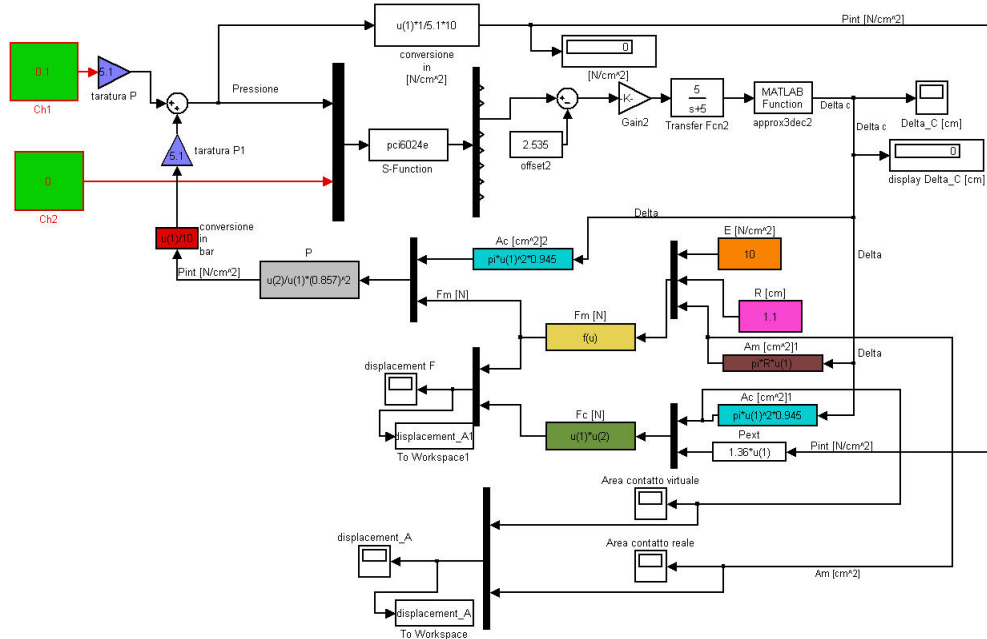


Figura 2.17: Schema a blocchi dettagliato del controllo “Inseguimento di Forza/Posizione” del CASR display, eseguito con Simulink, nel caso di inseguimento della curva Forza/Posizione data dalla teoria Hertziana.

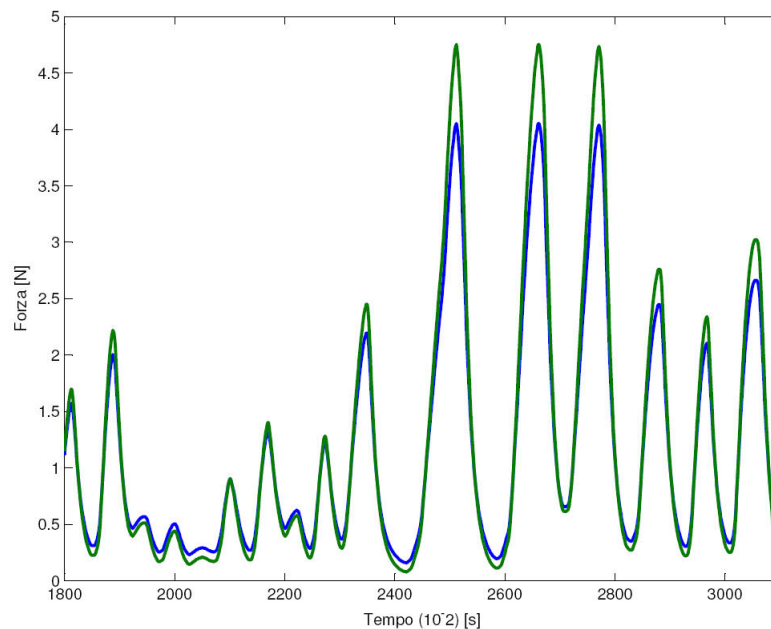


Figura 2.18: Curva di inseguimento tra la forza del CASR e quella di riferimento.

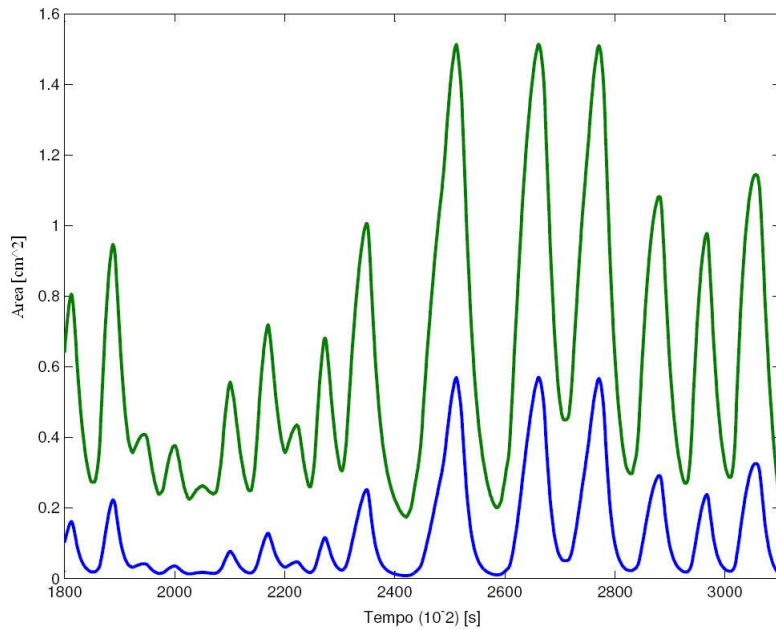


Figura 2.19: Displacement tra la superficie del CASR e quella di riferimento.

2.9 Conclusioni sui risultati sperimentali sul CASR

Con le tipologie di controllo riportate nei paragrafi (2.8.1) e (2.8.2) si sono ottenuti buoni risultati, ma è stato, anche, possibile individuare alcuni limiti del display CASR sia di tipo costruttivo che funzionale:

- sono presenti delle perdite di pressione dovute ai condotti di collegamento con le elettrovalvole e alle intercapedini tra i cilindretti del CASR;
- il controllo non è molto veloce a causa della servovalvola utilizzata che è in grado di simulare la curva del materiale solo per una banda molto bassa e corrispondente in pratica ad una applicazione quasi-statica della forza;
- l'escursione della deformazione risulta limitata a causa della dimensione dei cilindretti all'interno della camera del CASR. Essi limitano la percezione della cedevolezza dell'oggetto, non potendo simulare qualsiasi per motivi di carattere geometrico (vedi tesi Cap.3).

2.9 Conclusioni sui risultati sperimentali sul CASR

Una possibile soluzione è integrare il dispositivo cutaneo con un display cinestetico commerciale, presentato e descritto brevemente nel capitolo successivo.

Capitolo 3

Integrazione cutanea e cinestetica

3.1 Introduzione

Come è stato evidenziato nel precedente capitolo il controllo del dispositivo CASR risulta viziato da alcuni limiti. La soluzione a cui si è pensato per limitare tali problemi è stata quella di impiegare un dispositivo commerciale, il dispositivo DELTA della Force dimension.

3.2 Il dispositivo aptico DELTA

Il DELTA, riportato in dettaglio in figura(1.1), è un dispositivo di tipo cinestetico, avente 6 gradi di libertà che consentono di muoversi in un ampio spazio di lavoro e di aumentare la capacità di discriminare e di replicare oggetti e materiali diversi, un ampio campo di forze e una bassa inerzia. I parametri attraverso cui è possibile controllare il delta sono essenzialmente la posizione e la forza. Istante per istante, il controllo, legge la posizione attuale (*get position*) e setta di conseguenza la forza (*set force*) in funzione della cedevolezza che si sta simulando.

Le principali caratteristiche del Delta sono di seguito elencate:

- **spazio di lavoro** traslazione $\phi 360 \text{ mm} \times L 300 \text{ mm}$
- **forza** 20 N

- **Risoluzione lineare** $< 0.03 \text{ mm}$
- **rigidità closed loop** 14.5 N/mm
- **dimensioni** altezza 600 mm larghezza 700 mm profondità $400 - 750 \text{ mm}$.

3.3 Descrizione del dispositivo integrato

Per l'integrazione cutanea e cinestetica si è proceduto montando il CASR display sul Delta come è possibile vedere dallo schema semplificato in figura(3.1). In questa configurazione i due dispositivi risultano essere cinematicamente in serie, infatti in questo caso l'escursione totale del dispositivo in seguito all'applicazione di una forza risulta essere data da:

$$\delta = \delta_c + \delta_d \quad (3.1)$$

dove δ è lo spostamento dei cilindretti del CASR misurato dal sensore di Hall e δ_d è lo spostamento del Delta. Grazie a questa relazione il nuovo dispositivo non è più limitato dal δ_c . Per quanto riguarda le forze applicate queste risultano essere in parallelo, ovvero se si applica una forza F al CASR come mostrato in figura(3.1) si ha:

$$F = \frac{F_c \cdot F_d}{F_c + F_d} \quad (3.2)$$

Le due relazioni appena scritte rappresentano i due aspetti di maggiore distinzione tra il nuovo dispositivo e quello visto nel capitolo precedente.

3.4 Studio analitico e controllo

Anche in questo caso il sistema di controllo impiegato è quello dell'inseguimento di riferimento ed allo stesso tempo si vuole che vengano verificate le seguenti condizioni:

1. $A_r = A_c$

3.4 Studio analitico e controllo

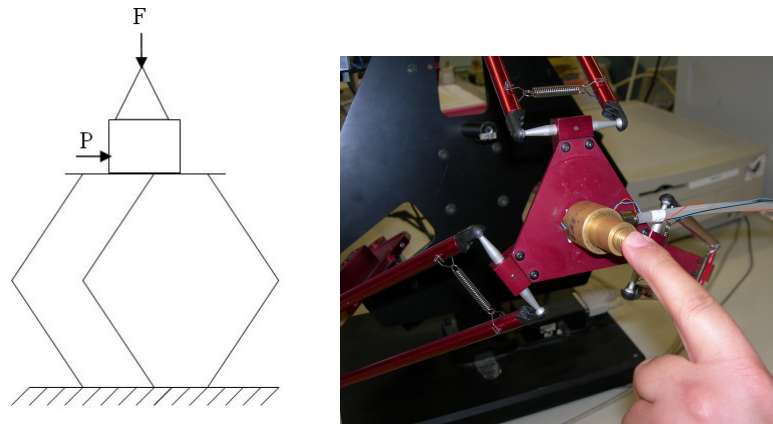


Figura 3.1: Schema dell'integrazione fra dispositivo cinestetico DELTA e cutaneo CASR (sinistra) e setup sperimentale utilizzato (destra).

2. $\delta_r = \delta_d + \delta_c$
3. $\delta_c < \delta_{max}$, dove δ_{max} è la massima escursione assiale che il cilindretto più interno del CASR può compiere prima di urtare contro il sensore ad effetto hall posto sul fondo della camera del CASR;
4. $F_r = \frac{F_c \cdot F_d}{F_c + F_d}$

Cioè si vuole che quando è applicata una data forza sia sul materiale reale che sul dispositivo essi reagiscono con gli stessi valori di forza, di escursione e di superficie di contatto. Uno schema di controllo semplificato è mostrato in figura(3.2).

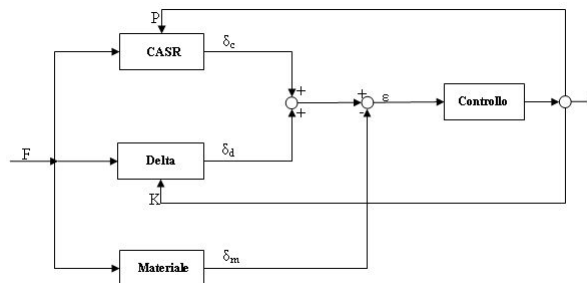


Figura 3.2: Schema di controllo a blocchi generale per il sistema integrato cutaneo e cinestetico

3.4.2 Controllo basato su curve teoriche

camera del CASR. Questo blocco riceve in ingresso il δ_c , il δ_d e il *Modulo di Young* ed esegue il calcolo della pressione secondo la relazione:

$$P = \frac{F_r \cdot F_d}{(F_d - F_r) \cdot A_c} \quad (3.3)$$

che si ricava dalla relazione (3.2) dove: F_c è sostituito con $P \cdot A_c$ dove A_c è data dalla relazione (2.5), F_d è quella data dal Delta, F_r è data dalla relazione (2.39) ricavata dalla teoria di *Hertz*, nella quale il delta è quello totale dato dalla relazione (3.1). Il blocco controllo calcola la forza F_d con cui pilotare il Delta. Questo controllore riceve in ingresso la pressione P , il δ_c , il δ_d e il *Modulo di Young* del materiale reale ed esegue il calcolo della forza F_d applicando la relazione

$$F_d = \frac{F_r}{1 - \frac{F_r}{P \cdot A_c}} \quad (3.4)$$

anche in questo caso ottenuta dalla relazione (3.2) analogamente al blocco precedente.

Naturalmente le varie quantità presenti vengono moltiplicate opportune costanti in modo da ottenere coerenza tra le unità di misura.

I risultati sperimentali relativi a questo controllo sono mostrati in figura(3.4).

3.4.2 Controllo basato su curve teoriche

In questo caso come riferimento viene impiegata una curva sperimentale

$$F_r = K_a \cdot A^2. \quad (3.5)$$

Mentre la forza sviluppata dal dal Delta viene posta come

$$F_d = K_d \cdot \delta_d. \quad (3.6)$$

Si parte dall'espressione

$$F_c = P \cdot A_c \quad (3.7)$$

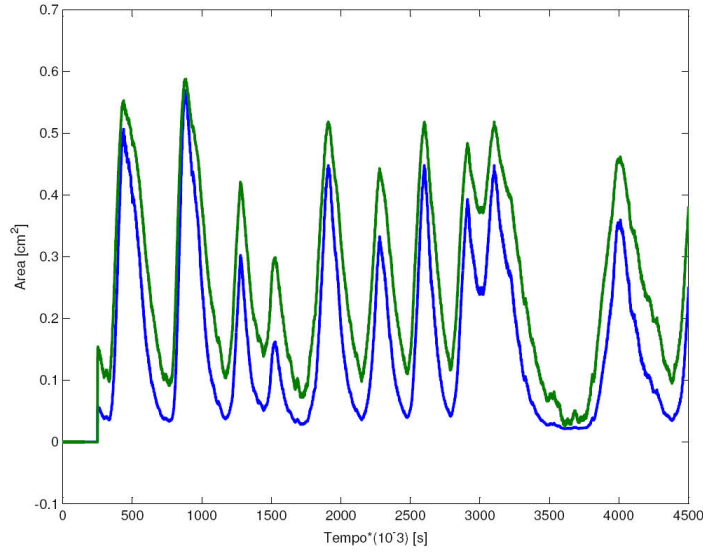


Figura 3.4: Inseguimento tra la superfici di contatto generata dal CASR durante la simulazione e quella di riferimento.

dove A_c è data dalla relazione (2.5). Da questa si può scrivere

$$P = \frac{F}{A_c} = \frac{K_a \cdot A^2}{A_c} = K_a \cdot A \quad (3.8)$$

è da notare che è stata imposta l'uguaglianza tra la superficie del CASR e la superficie di riferimento.

Quindi si è ottenuto il valore di pressione da inviare in retroazione al CASR, blocco di controllo in figura(3.5). Arrivati a questo punto resta da controllare la posizione del Delta. Si considerano le relazioni (3.6), (3.3) e (3.5) dalle quali si ha il delta di riferimento δ_{dr} ,

$$\frac{K_a}{K_d} A^2 - \delta_c = \delta_{dr} \quad (3.9)$$

questo viene confrontato con il δ_d , viene eseguito un controllo di tipo *PID* e viene inviato in retroazione al delta.

I risultati sperimentali in questo caso sono, mostrati in figura(3.6) e in figura(3.7).

3.4.2 Controllo basato su curve teoriche

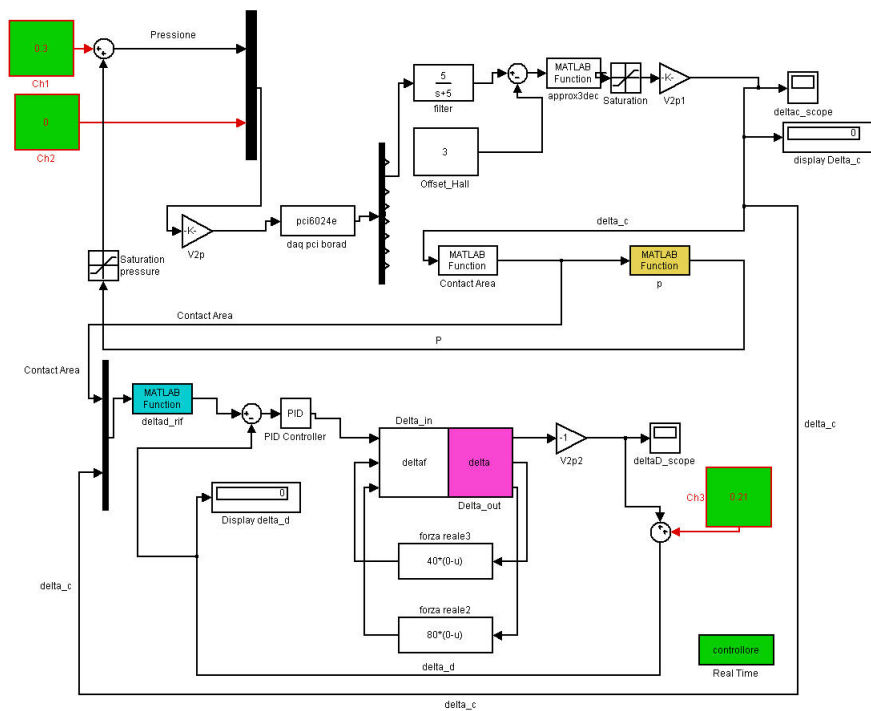


Figura 3.5: Schema a blocchi dettagliato, del controllo basato su curve teoriche, per il sistema integrato cutaneo e cinestetico

Capitolo 3. Integrazione cutanea e cinestetica

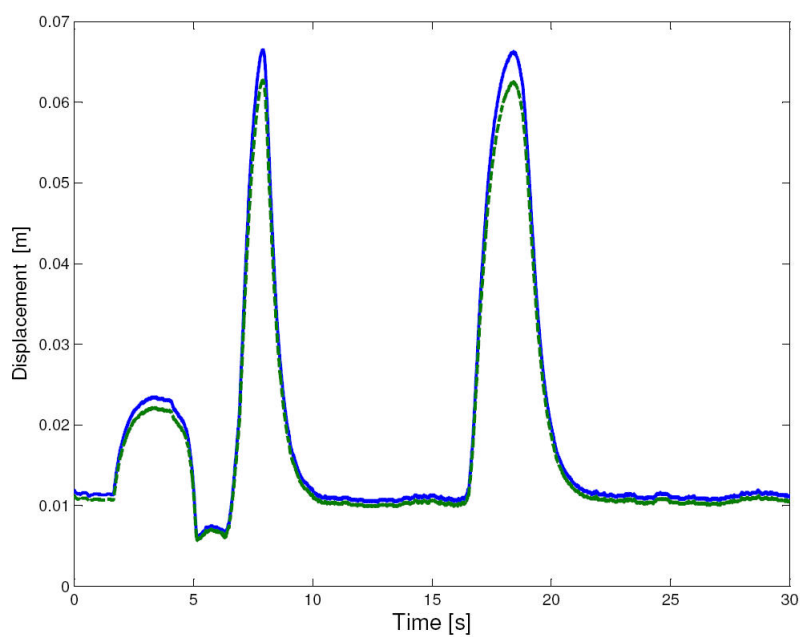


Figura 3.6: Displacement tra la deformazione del CASR e quello di riferimento.

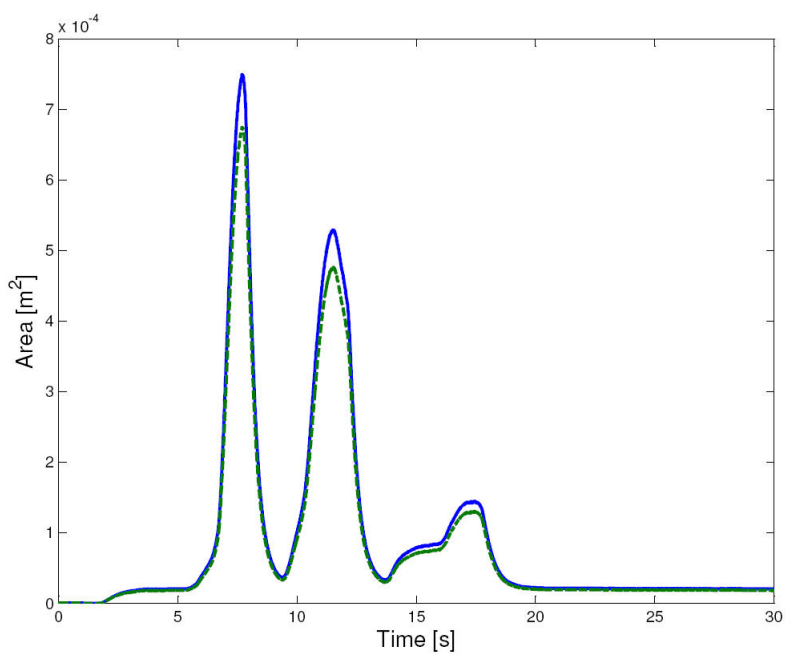


Figura 3.7: Inseguimento tra la superfici di contatto generata dal CASR durante la simulazione e quella di riferimento.

3.4.2 Controllo basato su curve teoriche

Come è possibile vedere dalle figure sopra riportate, risulta notevole rispetto al dispositivo che impiegava solo il display CASR, il miglioramento ottenuto nell'inseguimento dell'area di contatto e del displacement. Il sistema integrato ha dato risultati soddisfacenti anche da un punto di vista dinamico migliorando la velocità di risposta del sistema. È stato anche possibile migliorare il limite dovuto alla scarsa escursione di deformazione mostrato durante l'uso del solo dispositivo cutaneo. Permangono, invece, i limiti strutturali del sistema: perdite di pressione, singolo punto di contatto e assenza di sensori di forza.

Nel capitolo successivo sarà trattata l'ultima fase dello studio, ossia la progettazione e la realizzazione di un dispositivo multi-dito ponendo come obiettivo primario la risoluzione dei limiti strutturali legati al singolo punto di contatto presenti nei dispositivi fin ora impiegati.

Capitolo 4

Progettazione manipolatore a tre dita

4.1 Introduzione

L'obiettivo è quello di realizzare un dispositivo multi-finger, che sia portatile, leggero e capace di simulare in modo ergonomico l'interazione di presa e il riconoscimento degli oggetti.

Per rispettare il requisito della leggerezza sono stati presi in considerazione sia materiali polimerici che leghe di alluminio. Operando un buon compromesso fra caratteristiche di leggerezza e problemi di carattere realizzativi si è scelto come materiale di progetto l'alluminio. Infatti, date le ridotte dimensioni e i ridotti spessori degli anelli del CASR questi risultano difficili da realizzare al tornio con materiali con bassa rigidità.

Per consentire la simulazione di presa multi dito, il dispositivo realizzato si compone tre CASR montati in senso pressochè radiale. Più precisamente la loro posizione sul dispositivo è stata studiata in modo da realizzare una presa ergonomica. A tal proposito sono stati svolti dei test psicofisici su oggetti cilindrici di diverso diametro volti a determinare la naturale posizione delle dita su di essi. Questo aspetto viene considerato nel prossimo paragrafo.

4.2 Dimensionamento del dispositivo per una presa ergonomica

Uno degli aspetti più importanti affrontato nella progettazione del dispositivo a più punti di contatto è stata la determinazione di una posizione di presa comoda sia per le dita che per il polso e più in generale per il braccio.

La necessità di determinare una posizione di presa ergonomica deriva dalla natura stessa del dispositivo. Infatti questo dovendo replicare in ambiente virtuale il senso del tatto, dovrà essere nei limiti del possibile, filtrato da ogni disturbo che possa in qualche modo compromettere tale sensazione.

Nel corso della preparazione del setup sperimentale sono emersi diversi aspetti interessanti su i quali ci si è basati per l'acquisizione dei dati. Si è notato che la posizione delle dita sugli oggetto dipende da vari fattori, quali:

- altezza del piano su cui si trova l'oggetto;
- posizione del gomito;
- posizione del polso;
- posizione della spalla.

Questi aspetti sono importanti per quanto riguarda i gradi di libertà del braccio. Altri fattori che concorrono al posizionamento delle dita sull'oggetto sono legati ovviamente alla forma dell'oggetto stesso. Si è notato, infatti, che le dita si dispongono secondo angoli diversi al variare del diametro del provino, nel caso in cui ad esempio si consideri un provino di forma cilindrica.

4.2.1 Approcci del setup sperimentale

Da quanto appena esposto risulta chiaro che le variabili in gioco sono davvero tante per poter pensare di eseguire dei test che forniscano dei risultati validi in ogni condizione di presa. Questo ha portato a porre delle forti condizioni di vincolo sia sulla posizione dell'oggetto che su quella dell'utente, definendo così quella che nel seguito sarà indicata come "configurazione standard di presa per i test" (CSPT).

4.2.1 Approcci del setup sperimentale

Nel definire la CSPT si sono fatte le seguenti assunzioni:

- i gradi di libertà del braccio sono stati ridotti a tre parametri. Questi tre parametri sono rappresentati dagli angoli formati dal pollice, dall'indice e dal medio con lasse delle Y del sistema di riferimento rispetto a cui è stato riferito l'oggetto;
- l'altezza da terra dell'oggetto risulta fissata;
- L'oggetto è sempre disposto di fronte all'utente e spostato verso destra in modo da non dover richiedere rotazioni del gomito e della spalla sul piano orizzontale.

In questo modo, è stato possibile ottenere dei valori medi degli angoli di presa che garantiscono una presa ergonomica dell'oggetto sia a livello delle dita che di tutto il braccio. È chiaro che disegnando il dispositivo basandoci su questi angoli medi viene fissato un vincolo di ergonomia a cui l'utente dovrà comunque adeguarsi, stando attenti a garantire che il dispositivo venga usato il più possibile nella configurazione sperimentale. Tuttavia è stato qualitativamente verificato che anche la posizione di presa ha delle ampie tolleranze sulla ergonomia, ovvero variando la posizione dell'oggetto rispetto alla configurazione standard, in un certo intervallo, la "comodità" della presa non varia eccessivamente, permettendo così di poter eseguire con disinvoltura test di riconoscimento tattile anche per posizioni che si discostano lievemente dalla configurazione CSPT. Questa tolleranza sugli angoli di presa è stata confermata con l'uso diretto del dispositivo, una volta terminata la sua realizzazione. Concludendo possiamo dire che gli angoli e il diametro di presa determinati con questo test hanno un valore puramente indicativo, costituendo una base di partenza per la progettazione del dispositivo, e non possono essere in nessun modo assunti come vincolanti in maniera assoluta o entrare nel dettaglio di più complicati "approcci" psicofisici, che non sono di nostra competenza.

4.3 Descrizione del setup sperimentale

Fatte queste doverose premesse si può descrivere nel dettaglio il setup sperimentale che ha condotto alla determinazione degli angoli e delle dimensioni di ingombro in base alle quali è stato progettato il dispositivo “multi-contatto”.

Per eseguire il test è stato preparato un foglio in formato A4, che può essere osservato in figura(4.1), riportante 6 circonferenze con diametri che

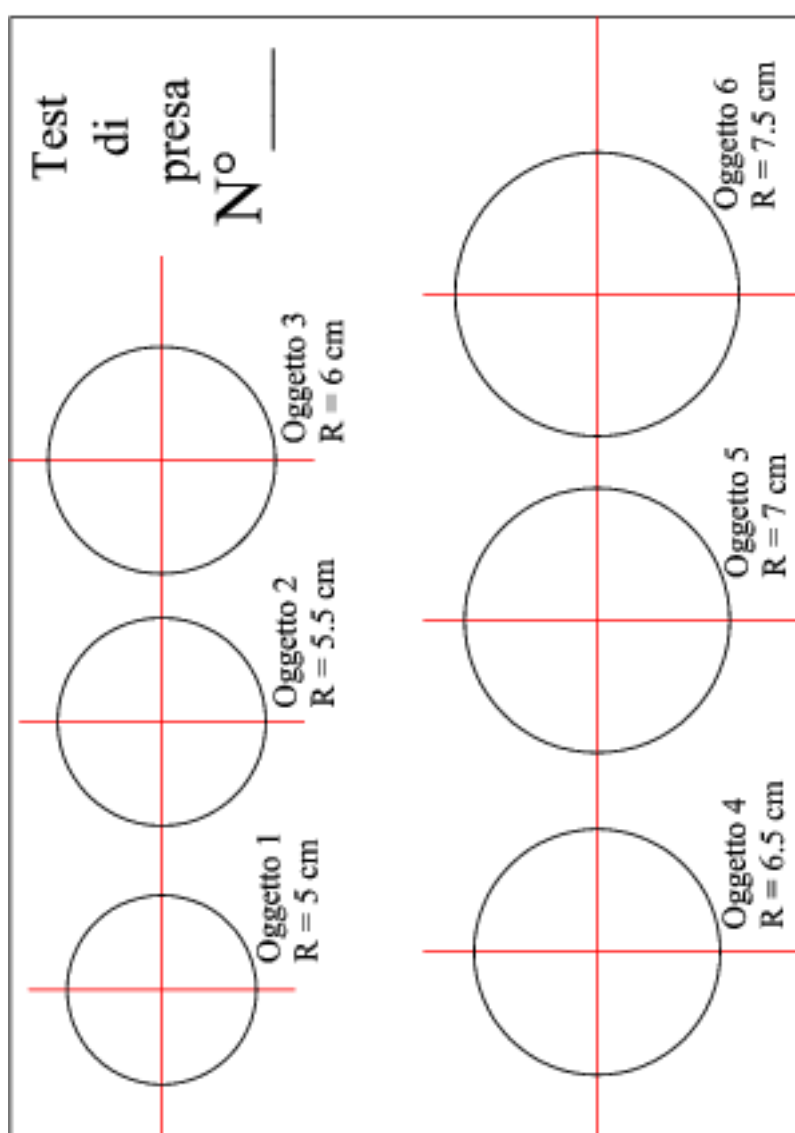


Figura 4.1: Foglio con le circonferenze per il setup sperimentale di afferraggio.

4.3 Descrizione del setup sperimentale

variano tra 5 cm e 7.5 cm e con un incremento di 0.5 cm tra una circonferenza e l'altra. Questo foglio poi è stato sottoposto all'attenzione di 6 persone di corporatura collocate in posizione fissa di fronte ad una postazione preparata appositamente per la prova. La postazione, che può essere vista in figura(4.2) e in figura(4.3), è così strutturata: su un piano, ad un'altezza di 73 cm da

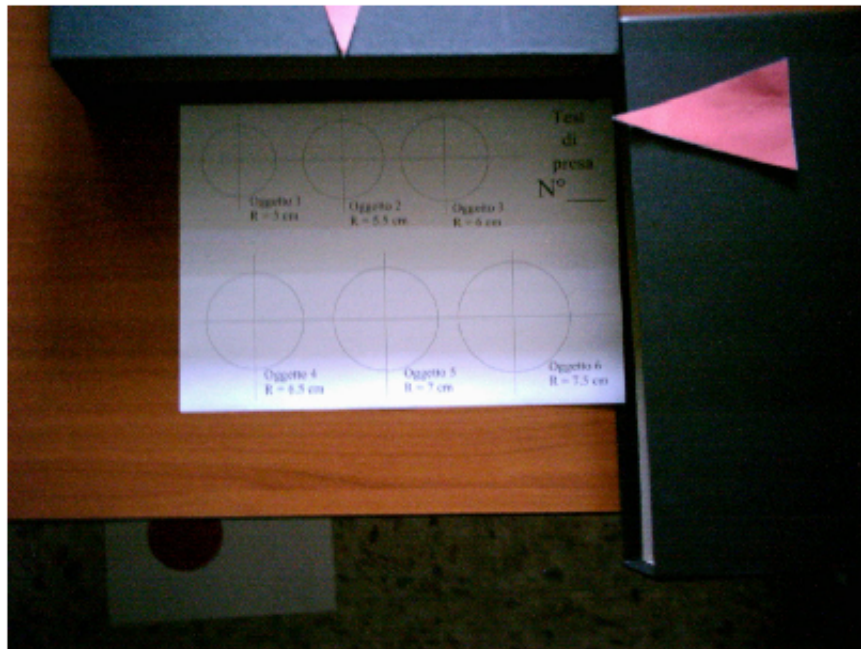


Figura 4.2: Postazione per le prove di presa.

terra sono state poste due frecce che indicano il punto in cui deve essere posta la circonferenza che sarà oggetto della prova di presa. Questo punto è stato posizionato ad una distanza di 15 cm da un altro punto posizionato sul pavimento che indica la posizione in cui dovrà cadere in modo perpendicolare l'asse longitudinale del corpo dell'utente. Abbiamo così descritto quella che in precedenza avevamo presentato come "configurazione standard di presa pre i test". Quindi facendo passare in sequenza le 6 circonferenze per la posizione indicata dalle frecce viene chiesto ad ogni utente di disporre le dita su di essa simulando l'atto dell'afferraggio e vengono così rilevati gli angoli di presa rispetto all'asse y come mostrato in figura(4.4). I dati così ottenuti, per ogni utente, vengono raccolti su una tabella ed in fine, per ogni circonferenza,

Capitolo 4. Progettazione manipolatore a tre dita

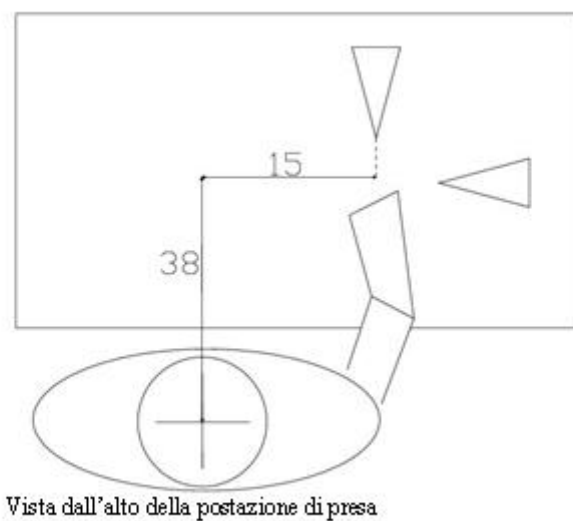
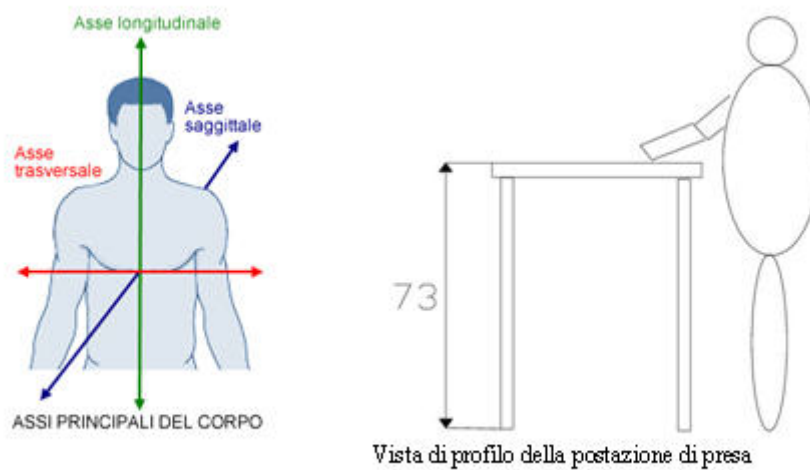


Figura 4.3: Postazione per le prove di presa.

4.3 Descrizione del setup sperimentale

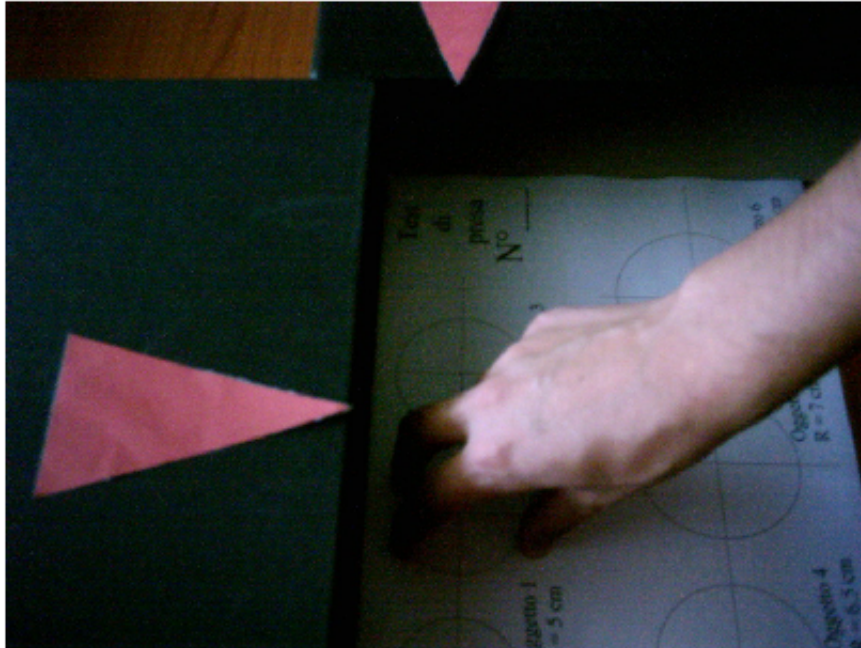


Figura 4.4: Immagine rappresentativa del test.

viene calcolato un valore medio degli angoli. I valori medi ottenuti possono essere osservati in figura(4.5) e come già a avevamo accennato si può vedere come passando dalle circonferenze più piccole a quelle più grandi gli angoli tra le dita aumentano.

Durante i test è stato anche chiesto agli utenti quale delle circonferenze erano più comode da afferrare. Questa domanda è stata posta con lo scopo di individuare un diametro che consentisse una presa comoda dell'oggetto. Da queste risposte, come si può osservare in figura(4.6), si è visto che le circonferenze più comode sono quelle più piccole di 7.5 cm risulta in pratica scomoda. Tuttavia per motivi di carattere realizzativo abbiamo dovuto optare per una soluzione di compromesso che vede il suo "ottimo" nella circonferenza da 7 cm, tenendo conto delle difficoltà costruttive e realizzative.

	Pollice	Indice	Medio
I	24,4	18,4	25
II	27,9	21	27,8
III	29,3	22,9	30,9
IV	30,7	24,7	34,1
V	34,1	26,5	40,3
VI	36,6	29,4	43,8

Figura 4.5: Valori medi, espressi in gradi, ottenuti dalle prove di presa.

4.4 Sensori di forza e di posizione

Ai fini del controllo del dispositivo multi-finger abbiamo pensato di utilizzare dei sensori di forza e di posizione.

Per quanto riguarda i sensori di posizione si è scelto di usare un sensore ad effetto *Hall* (Edwin Hall, 1879). In questi sensori un campo magnetico trasversale rispetto ad un conduttore attraversato da una corrente determina nel conduttore la nascita di un campo elettrico diretto perpendicolarmente al campo magnetico ed alla corrente. All'origine dell'effetto c'è la forza di Lorentz. La scelta è ricaduta su questo sensore perchè già impiegato con buoni risultati sui singoli CASR come verificato nelle prove sperimentali riportate nei capitoli (2) e (3).

Per quanto riguarda i sensori di forza si è scelto di impiegare delle celle di carico in grado di leggere forze con componenti di trazione e compressione. Esse sono utili per apprezzare come nella presa multi-dito vengono distribuite le forze.

Per completezza, in appendice (A), vengono riportati i principi di funzionamento e i sistemi di condizionamento per i sensori utilizzati.

4.4 Sensori di forza e di posizione

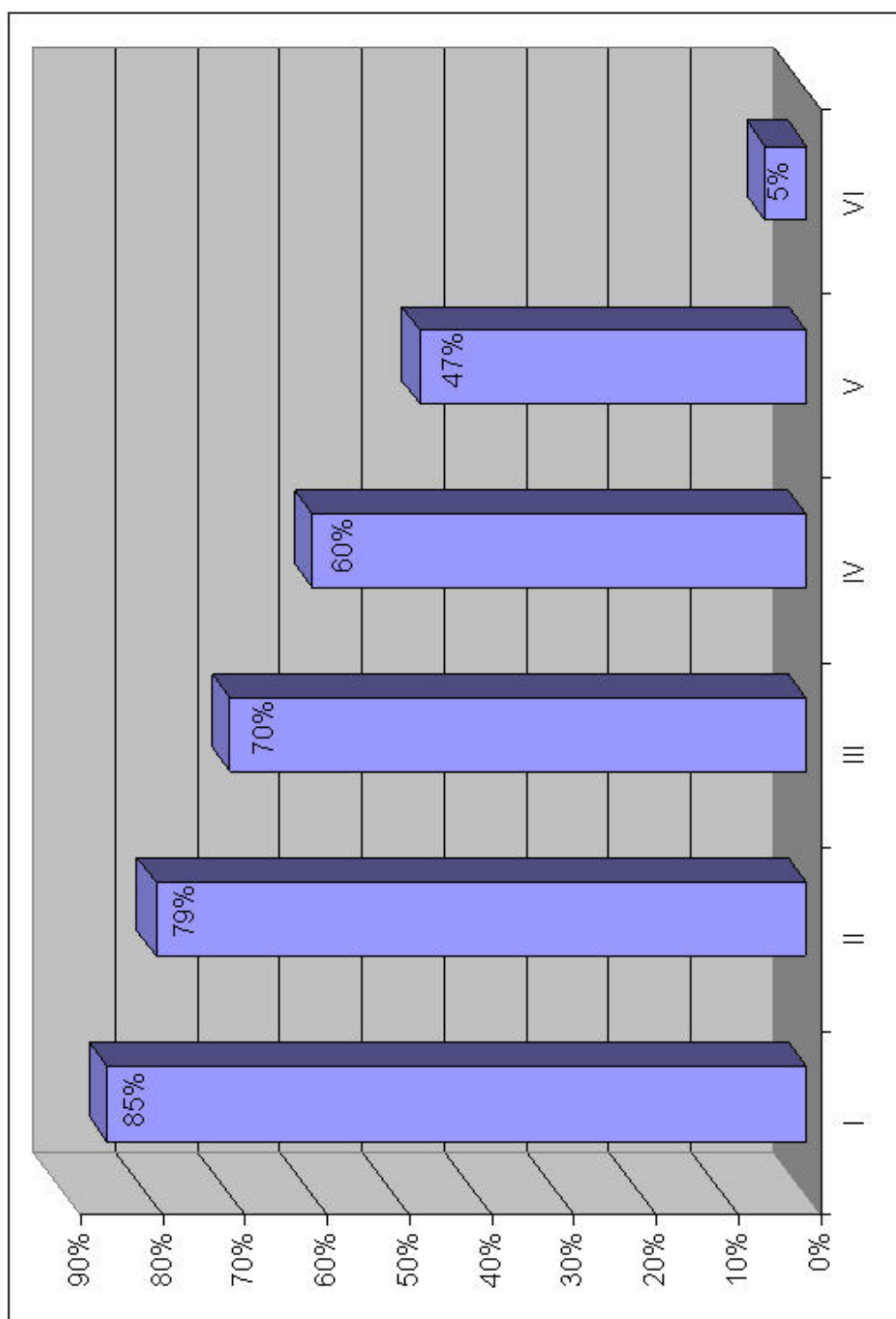


Figura 4.6: Grafico che rappresenta l'ergonomicità degli oggetti.

4.5 Specifiche delle celle

Per rispettare le dimensioni definite nel paragrafo (4.2) è stata svolta un'approfondita ricerca che ha portato all'individuazione di due tipi di sensori miniaturizzati adatti al nostro scopo.

Il primo tipo riguarda una cella di carico a bottone capace di leggere solo forze di compressione con le seguenti caratteristiche tecniche [18]:

- Materiale: acciaio ad alta resistenza;
- Campo di misura $0 \div 100$ Kg;
- Errore totale 0,5%FS;
- Alimentazione consigliata 5V;
- Connessione elettrica mediante cavo.

Le dimensioni di ingombro sono molto ridotte come è possibile vedere in figura(4.7).

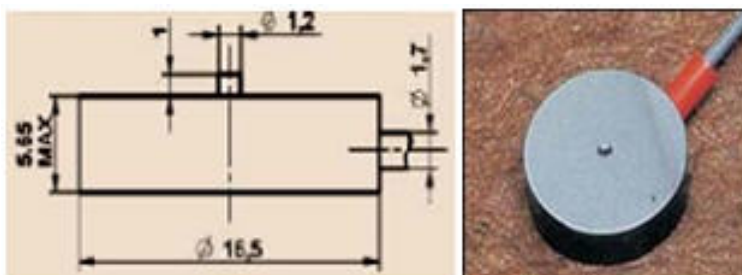


Figura 4.7: Cella di carico a bottone BC 302-100Kg. Le dimensioni riportate sono espresse in millimetri.

La seconda tipologia di celle, mostrata in figura(4.8), consente di leggere le forze sia in trazione che in compressione. Le caratteristiche tecniche di queste celle sono [19]:

- Materiale: alluminio;
- Campo di misura da 0-200N in compressione e trazione;

4.5.1 Soluzione con le celle montate sulla base del CASR



Figura 4.8: Cella di carico XFTC311 SERIES

- Errore totale 0,5%FS;
- Alimentazione 10Vdc.

Le dimensioni di ingombro di queste celle sono:

- Lunghezza 36mm;
- Diametro 10mm.

Queste due tipologie di celle di carico hanno dato la possibilità di sviluppare due soluzioni alternative.

4.5.1 Soluzione con le celle montate sulla base del CASR

Partendo dai risultati ottenuti dai test psicofisici di presa, il primo passo della progettazione è stato quello di agire sul ridimensionamento del CASR, visto che le dimensioni del CASR attuale sono nettamente incompatibili con i risultati ottenuti, in figura(4.9) è possibile crearsi un'idea della differenza di dimensioni tra il vecchio ed il nuovo CASR display.

Il CASR utilizzato in questa prima soluzione presenta le seguenti caratteristiche tecniche: è costituito da 8 anelli ed un perno centrale, in grado

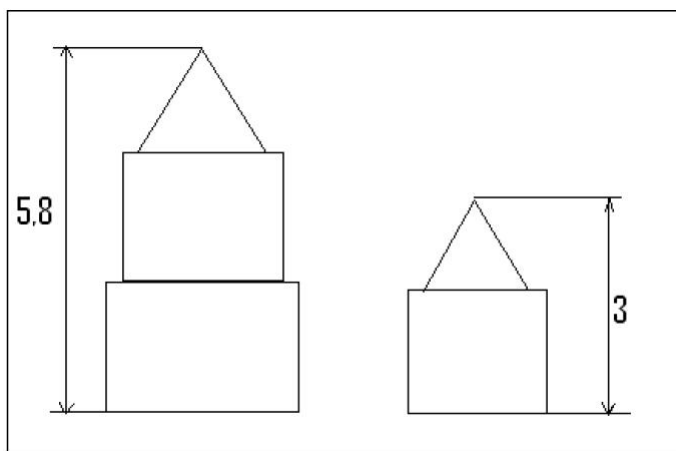


Figura 4.9: Rappresentazione schematica del vecchio CASR display (sinistra) e di quello nuovo (destra), con le rispettive dimensioni di ingombro. Le dimensioni riportate in figura sono espresse in cm.

di scorrere in modo telescopico l'uno dentro l'altro come mostrato in figura(4.10). Il perno centrale è dotato all'estremità inferiore di un piccolo magnete permanente in grado di interagire con il sensore ad effetto *Hall* per la determinazione della posizione del perno. Questi componenti sono alloggiati all'interno di una camera costituita da una ghiera e da un anello esterno. Alla base dell'anello esterno vi è il foro filettato per l'ingresso dell'aria compressa, che mediante un'elettrovalvola permette di controllare la rigidità del sistema telescopico dei cilindri.

In questa prima ipotesi sono state utilizzate le celle a bottone che hanno dato la possibilità di realizzare un dispositivo con un diametro massimo di ingombro di 70 mm compatibile con i dati ottenuti dai test.

Come è possibile vedere in figura(4.11) le celle sono state montate all'interno del dispositivo in modo da essere sollecitate a compressione dai CASR.

Il CASR è alloggiato all'interno di una guida che gli permette, in seguito all'applicazione di una forza, di scorrere in senso assiale e di trasmettere la forza alla cella di carico, che a sua volta è posizionata all'interno di una piastrina di sostegno come può essere visto in figura(4.12).

4.5.1 Soluzione con le celle montate sulla base del CASR

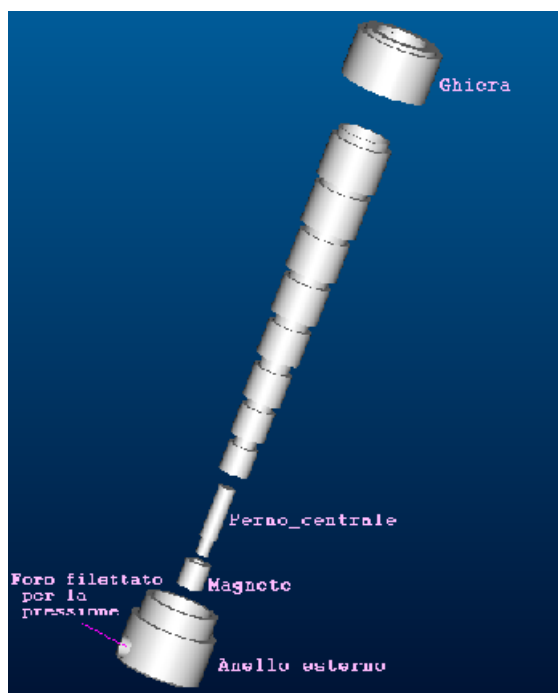


Figura 4.10: CASR esploso

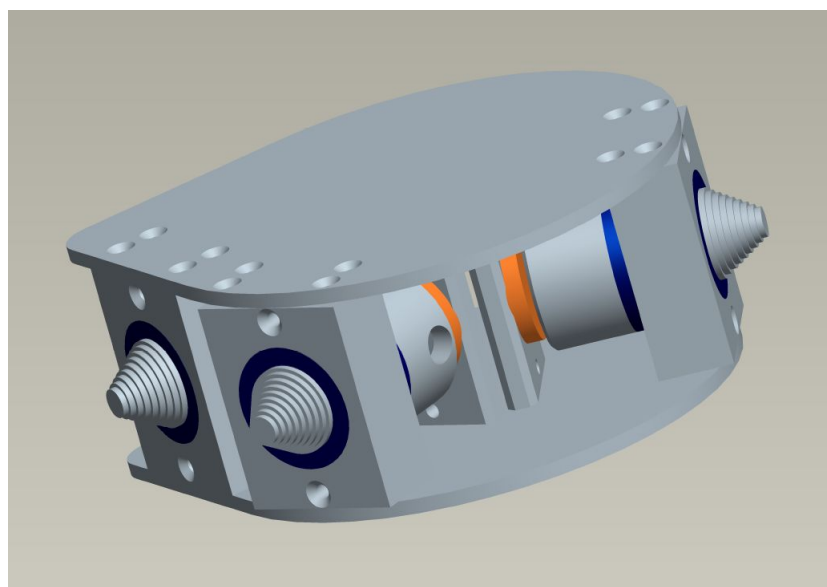


Figura 4.11: Complessivo

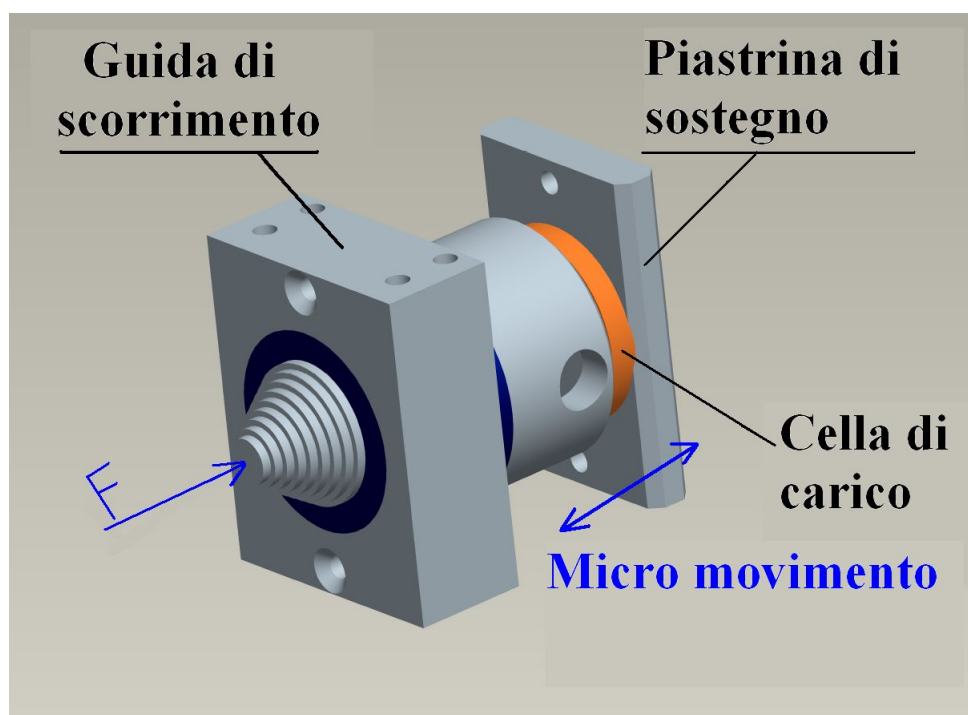


Figura 4.12: Complessivo CASR con cella di carico

4.5.2 Soluzione con le celle montate frontalmente rispetto ai CASR

Le celle di carico XF7C311 SERIES che come ricordiamo consentono una lettura della forza anche in trazione hanno permesso di realizzare un dispositivo con i CASR montati su una circonferenza interna a quello in cui sono disposte le celle di carico come è possibile vedere in figura(4.13). I componenti del CASR sono gli stessi che sono stati utilizzati nella prima soluzione, con qualche modifica per quanto riguarda la ghiera e l'anello esterno visibili in figura(4.14). In questa ipotesi realizzativa il diametro massimo di ingombro è di 200 mm, mentre il diametro di presa delle dita è di 60 mm.

Il CASR è sospeso alla cella di carico mediante una intelaiatura che viene avvitata all'estremità filettata della cella. Quest'ultima a sua volta è fissata con una vite al porta-cella montato sulla circonferenza esterna del dispositivo. In questo modo il complessivo costituito dalla cella e dal CASR risulta essere sospeso nel vuoto, quindi le uniche forze che agiscono su di esso sono

4.5.2 Soluzione con le celle montate frontalmente rispetto ai CASR

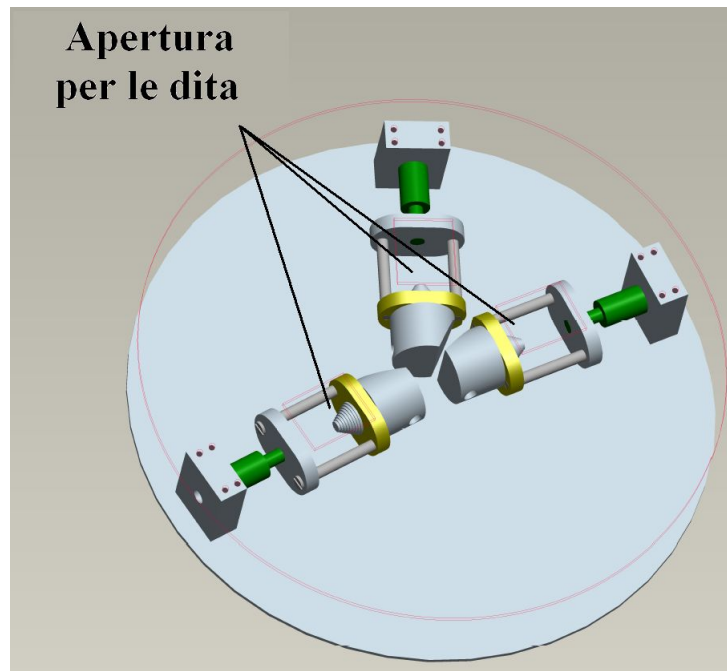


Figura 4.13: Complessivo seconda soluzione

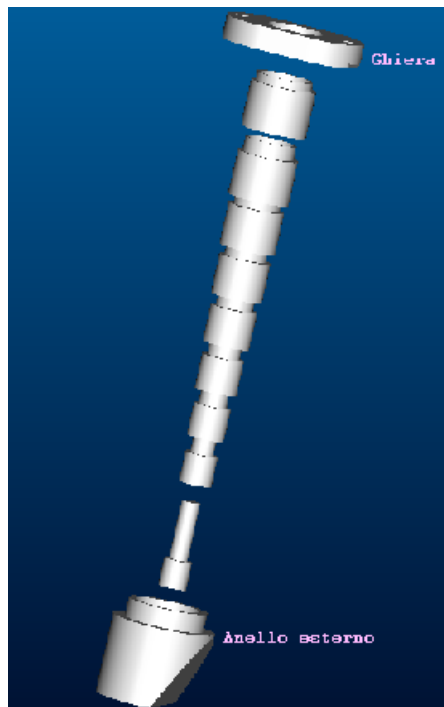


Figura 4.14: CASR per la seconda soluzione esploso

Capitolo 4. Progettazione manipolatore a tre dita

quelle esercitate dalle dita. In figura(4.15) è possibile vedere il complessivo costituito dal CASR, dall'intelaiatura e dalla cella.

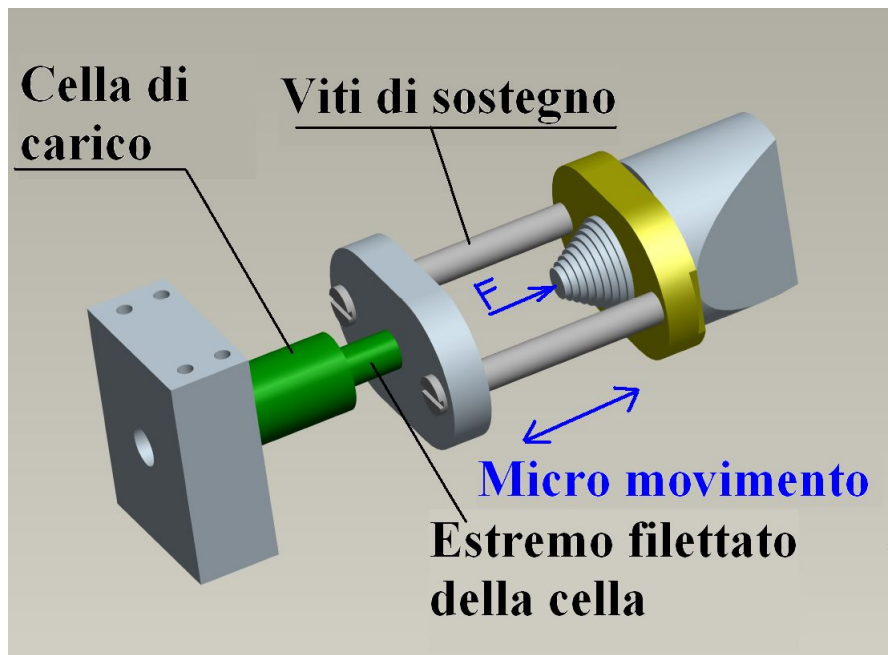


Figura 4.15: Complessivo CASR con cella di carico

4.6 Considerazioni per la scelta del dispositivo da realizzare

Dopo un'analisi comparativa dei vantaggi e degli svantaggi di entrambe le soluzioni sopra esposte si è optato per la realizzazione del dispositivo numero uno. Per comprendere meglio le motivazioni della scelta illustriamo qui di seguito in maniera dettagliata quelli che sono i pregi e i difetti delle due soluzioni.

Soluzione con celle interne.

Vantaggi:

- Semplicità costruttiva
- Minori dimensioni

4.6 Considerazioni per la scelta del dispositivo da realizzare

- Minor peso

Svantaggi:

- Il dito medio non è posizionato secondo il giusto angolo di presa
- Il diametro di presa è più grande
- Attrito tra CASR e porta-casr che potrebbe disturbare la lettura della forza.

Soluzione con celle esterne.

Vantaggi:

- Presa più ergonomica
- Diametro di presa più piccolo, quindi più comodo
- Non presenta attrito

Svantaggi:

- Maggiore ingombro
- Maggiore peso
- CASR difficile da realizzare.

Alla luce di quanto esposto la nostra scelta è giustificata principalmente da due motivazioni: il rispetto dei requisiti di leggerezza, portabilità, minimo ingombro e dalla necessità di non gravare ulteriormente sulle già elevate difficoltà di realizzazione del CASR display.

È evidente che con questo nuovo dispositivo risulta essere sicuramente superato il limite strutturale di un solo punto di contatto. In modo meno evidente, ma comunque, con risultati altrettanto soddisfacenti, è stato risolto anche il problema delle perdite di pressione, che sin dalle prime prove sono risultate essere quasi impercettibili, nonostante il sistema sia stato forzato sino ad oltre 4 bar laddove è stato previsto di utilizzare una pressione nominale di soli 2 bar.

Capitolo 5

Considerazioni conclusive sul dispositivo Multi-Dito e risultati sperimentali

Gli aspetti di maggiore innovazione introdotti dal nuovo dispositivo, rispetto all'impiego del vecchio CASR display, sono rappresentati dalle dimensioni molto più contenute dei singoli CASR, dalle minori perdite di pressione, dai tre punti di contatto, e dall'impiego dei sensori di forza.

Il primo vantaggio legato alle dimensioni ridotte è quello di rendere il CASR più leggero e portatile. La maggiore portabilità è dovuta anche al fatto che la richiesta del volume d'aria da parte della camera di pressione del dispositivo è minore, il che permette di poter alimentare il sistema con un compressore di capacità e dimensioni più ridotte. Il secondo vantaggio, sempre legato alla minore richiesta di volume d'aria, è che il sistema risulta essere più veloce nelle risposte indotte dal controllo, con un conseguente aumento di banda.

Un altro aspetto che concorre nel migliorare la velocità di risposta del sistema di controllo è quello dovuto alle minori perdite di pressione che consentono di limitare ulteriormente la capacità di aria richiesta alla sorgente. Le minori perdite di pressione tra le intercapedini dei cilindretti del CASR display migliorano anche il confort nell'utilizzo. Questo aspetto risulta di grande

Capitolo 5. Considerazioni conclusive sul dispositivo Multi-Dito e risultati sperimentali

importanza se si pensa ad esperimenti di riconoscimento fine tra oggetti con minime differenze di cedevolezza. In questi casi il raffreddamento dell'estremità del dito legato ad esempio ad aspetti di carattere termico e legati al tipo di materiale utilizzato ha sicuramente effetti nel senso di una minore capacità sensoriale.

I tre punti di contatto rappresentano sicuramente un grande miglioramento apportato alle possibilità offerte dagli attuali dispositivi di stimolazione tattile. Infatti si ricorda, (vedi capitolo (1)), che sono, tutti o quasi, ad un solo punto di contatto e nella maggior parte dei casi hanno solo proprietà di tipo cinestetiche. I tre punti di contatto permettono di poter afferrare gli oggetti virtuali e sentirne la cedevolezza su più punti contemporaneamente e consentono di riconoscere se un oggetto presenta zone a diversa consistenza.

Un limite di questo dispositivo è rappresentato dal fatto che non è possibile muoversi all'interno del workspace virtuale per spostare gli oggetti afferrati. Quindi il sistema consente solo di tastare gli oggetti che man mano vengono sottoposti all'utente durante le prove sperimentali. Tuttavia queste funzionalità possono essere implementate impiegando anche in questo caso un dispositivo come ad esempio il Delta (3.2).

Un'altra funzionalità di grande rilievo è l'impiego nel dispositivo, di celle di carico. Il loro uso ha un duplice vantaggio. In primo luogo, si ha una lettura diretta della forza esercitata da ogni dito e non calcolata in modo analitico. Il secondo vantaggio è che è possibile monitorare ed analizzare la distribuzione delle forze sugli oggetti durante le operazioni di presa.

Gli esperimenti che si sono svolti con il nuovo dispositivo, subito dopo la sua realizzazione e le dovute operazioni di calibrazione dei sensori di *Hall* e delle celle di carico, si basano sull'acquisizione della distribuzione di forza durante la presa di tre differenti oggetti.

5.1 Risultati sperimentali

Come detto, per illustrare la funzionalità del dispositivo, si è scelto di simulare tre differenti oggetti sferici: i primi due oggetti omogenei ma con diversa cedevolezza tra di loro, l'ultimo oggetto con tre diverse cedevolezza per cias-

5.1 Risultati sperimentali

cun dito. È stato possibile acquisire in tempo reale sia le deformazioni che le forze applicate dalle tre dita.

Si è considerato inizialmente un provino sferico omogeneo in termini di cedevolezza, ossia avente modulo di Young costante su tutto il volume ed avente diametro 7 cm, in accordo con le dimensioni del dispositivo.

Tale oggetto è stato simulato prima inviando ai tre CASR tre valori di pressione identici tra loro e pari a 1,5 bar. L'oggetto reale corrispondente è una sfera deformabile e piuttosto cedevole. Il risultato di tale simulazione è riportato in figura(5.1) dove sono rappresentate deformazione e forza su ciascun dito durante l'esplorazione.

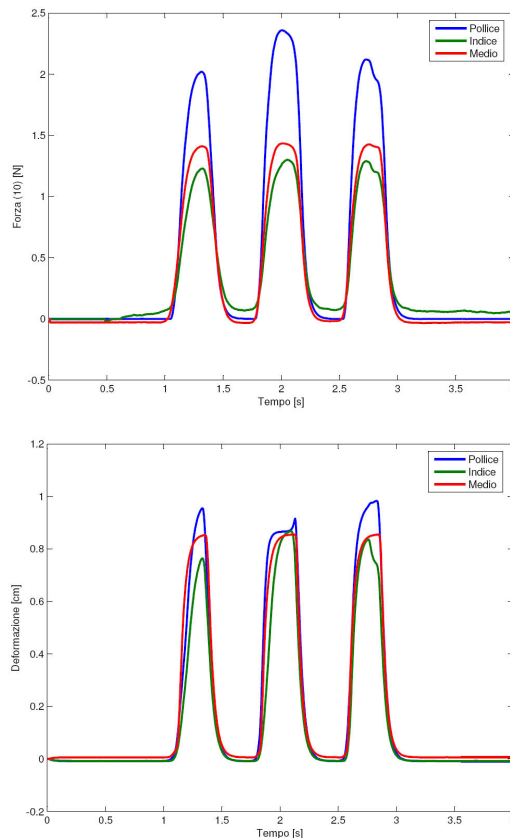


Figura 5.1: Andamento delle forze (sopra) e andamento delle deformazioni (sotto), esercitate dal pollice, dall'indice e dal medio durante la simulazione di presa di un oggetto ottenuto mandando nei tre CASR una pressione costante di 1,5 bar.

Capitolo 5. Considerazioni conclusive sul dispositivo Multi-Dito e risultati sperimentali

Successivamente è stata simulata una sfera avente le stesse dimensioni spaziali, nuovamente omogenea, fissando le tre pressioni su ciascun componente CASR a 1 bar. In tal caso l'oggetto simulato è una sfera più rigida. Il risultato di tale simulazione è riportato in figura(5.2) dove sono rappresentate deformazione e forza su ciascun dito durante l'esplorazione.

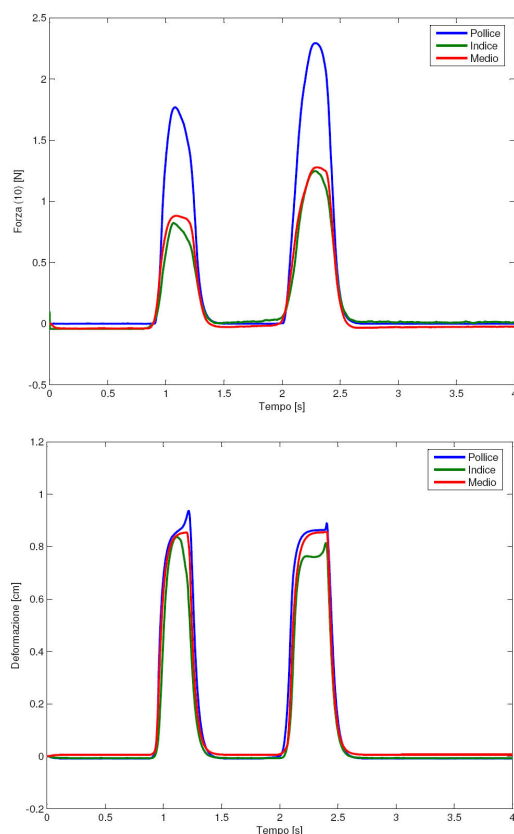


Figura 5.2: Andamento delle forze (sopra) e andamento delle deformazioni (sotto), esercitate dal pollice, dall'indice e dal medio durante la simulazione di presa di un oggetto ottenuto mandando nei tre CASR una pressione costante di 1 bar.

L'ultima simulazione qui presentata ha preso in considerazione una sfera delle stesse dimensioni, ma con pressioni diverse su ciascun dito pari rispettivamente a 1,5 bar per il pollice, 1,25 bar per l'indice ed 1 bar per il medio. L'idea in questo caso era di simulare un oggetto sferico cedevole deformabile e disomogeneo in termini di cedevolezza. Il risultato di tale simulazione

è riportato in figura(5.3) dove sono rappresentate deformazione e forza su ciascun dito durante l'esplorazione.

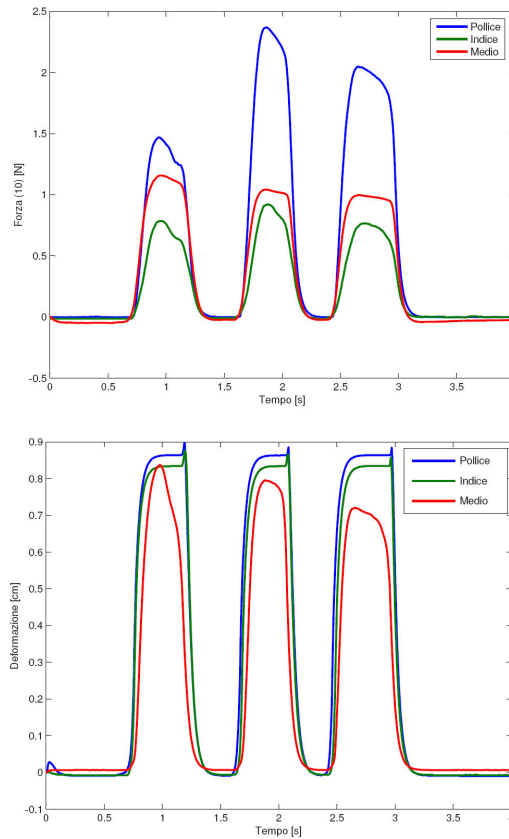


Figura 5.3: Andamento delle forze (sopra) e andamento delle deformazioni (sotto), esercitate dal pollice, dall'indice e dal medio durante la simulazione di presa di un oggetto ottenuto mandando nel CASR corrispondente al pollice una pressione costante di 1,5 bar, in quello corrispondente all'indice una pressione costante di 1,25 bar e nel CASR corrispondente al medio una pressione costante di 1 bar.

5.2 Osservazioni

Analizzando le figure si notano alcuni aspetti particolarmente interessanti. Dalla figura(5.1) si vede, ad esempio, che nella presa dell'oggetto la forza sviluppata dal pollice risulta raggiungere valori pari a quasi il doppio della

Capitolo 5. Considerazioni conclusive sul dispositivo Multi-Dito e risultati sperimentali

forza sviluppata dalle altre dita. Questa caratteristica risulta essere confermata anche nella seconda prova di presa mostrata in figura(5.2), dove l'oggetto è comunque meno cedevole. L'operatore può facilmente riconoscere che il secondo oggetto è più cedevole del precedente. Per quanto riguarda le forze sviluppate dall'indice e dal medio queste si mantengono mediamente uguali sia nella prima che nella seconda prova di presa.

Le cose non cambiano neanche nella terza prova di presa, mostrata in figura(5.3). Infatti anche in questo caso, pur essendo l'oggetto disomogeneo, la forza sviluppata dal pollice risulta essere maggiore di quella sviluppata dalle altre due dita. Tuttavia, la maggiore forza sviluppata dal dito medio rispetto a quella sviluppata dall'indice, è giustificata in tal caso dal fatto che, nel CASR corrispondente al dito medio, viene inviata una pressione maggiore rispetto a quella mandata nell'altro CASR. In particolare in quest'ultima prova l'operatore può facilmente riconoscere che l'oggetto è disomogeneo.

Si osservi che le simulazioni ottenute sono comunque in accordo con i risultati teorici derivati dalla legge di hertz, presentata nel capitolo (2).

Capitolo 6

Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di progettare e realizzare un display tattile in grado di simulare un'interazione multi contatto con oggetti virtuali, privilegiando la sensazione cutanea. La principale motivazione è che la maggior parte dei dispositivi aptici commerciali sono tipicamente cinestetici e hanno un'interazione con l'ambiente virtuale stabilita attraverso un solo punto di contatto. Le ulteriori specifiche che sono state poste come obiettivo riguardano la leggerezza, la portabilità, il minimo ingombro e la facile realizzazione.

Il punto di partenza del nostro studio è stato il CASR (Contact Area Spread Rate) display, precedentemente studiato presso il Centro Interdipartimentale di Ricerca E. Piaggio". L'ipotesi su cui si basa il dispositivo CASR, è che la maggior parte delle informazioni tattili necessarie per discriminare la morbidezza degli oggetti tramite interazione tattile è regolata dalla legge che lega la forza e l'area di contatto, ossia il rapporto con cui l'area di contatto aumenta sul dito man mano che questo viene premuto sempre con più forza sull'oggetto. La conferma teorica di questa osservazione è giustificabile utilizzando la teoria standard di Hertz sul contatto tra due corpi elastici.

Per consentire la presa multi dito il dispositivo che è stato realizzato si compone di tre differenti CASR display montati in configurazione pressochè radiale. Più precisamente la loro disposizione è stata studiata in modo da garantire una presa ergonomica, svolgendo test psicofisici su oggetti cilindrici

Capitolo 6. Conclusioni

di diverso diametro volti a determinare la naturale posizione delle dita e le dimensioni di ingombro massime consentite per una presa comoda da parte di una mano di medie dimensioni.

Il dispositivo è stato dotato di opportuni sensori di posizione ad effetto *Hall* e sensori di forza (i dettagli sono riportati in Appendice A).

Come sensori di forza la scelta è stata fatta tra due diversi tipi di celle di carico che hanno dato lo spunto per due differenti soluzioni costruttive.

La prima soluzione prevede l'impiego di una cella di carico di tipo a bottone in grado di misurare solo carichi di compressione. Ciò, ha permesso di realizzare un dispositivo con dimensioni ridotte di ingombro, basso peso, e semplice da costruire anche se presenta lo svantaggio di un non perfetto allineamento del dito medio secondo il giusto angolo di presa valutato con l'indagine psicofisica (Par.4.5.1). La seconda soluzione considera, invece, l'impiego di una cella di carico che consente la lettura della forza sia in trazione che in compressione. Ciò, ha consentito di realizzare una seconda soluzione costruttiva che presenta un posizionamento delle dita leggermente più ergonomico del primo e minori attriti ma con lo svantaggio di un maggiore ingombro e peso e, con un CASR di difficile realizzazione (Par.4.5.2). Considerando i vantaggi e gli svantaggi di entrambe le soluzioni si è optato per la realizzazione della prima soluzione.

Gli aspetti di maggiore innovazione introdotti dal nuovo dispositivo, rispetto all'impiego del vecchio CASR, sono rappresentati dalle dimensioni molto più contenute dei singoli CASR, dalle minori perdite di pressione, dai tre punti di contatto, e dall'impiego di opportuni sensori di forza.

Per verificare infine l'efficacia e la funzionalità del dispositivo si è reso necessario preparare un opportuno setup sperimentale.

Il sistema di controllo finale sviluppato ed implementato in ambiente Matlab, è in grado di impostare, modulando le pressioni delle servovalvole, in modo indipendente, la cedevolezza di ogni componente CASR. Inoltre è possibile misurare con precisione le forze e la deformazioni di ogni dito durante l'esplorazione degli oggetti virtuali simulati.

In particolare è stato possibile simulare delle sfere deformabili omogenee e disomogenee in termini di consistenza e sono state monitorate sia le defor-

mazioni che le forze imposte sul provino in fase di esplorazione e presa. I risultati sperimentali ottenuti e riportati nel capitolo (5) sono in accordo con i risultati teorici ricavati dalla teoria hertziana.

Appendice A

Sensori di Forza e di posizione

A.1 Principi di funzionamento dei sensori ad effetto *Hall*

I sensori più versatili, con grande sensibilità e capacità di determinare anche la direzione del campo magnetico, sono quelli che sfruttano l'effetto *Hall* in un cristallo semiconduttore.

L'effetto Hall è schematicamente il seguente: in un semiconduttore di forma parallelepipedica, rappresentato in figura(A.1) immerso in un campo

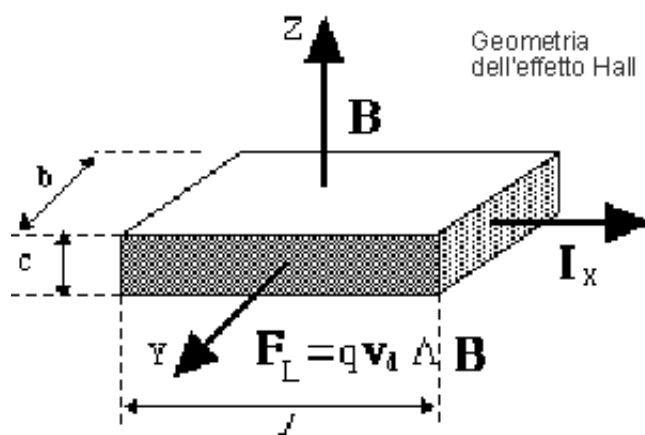


Figura A.1: Schema di funzionamento dell'effetto *Hall*.

magnetico uniforme B diretto secondo l'asse z , si fa passare una corrente

Capitolo A. Sensori di Forza e di posizione

elettrica di intensità I_x secondo l'asse x .

Gli elettroni acquistano una velocità di deriva $v_d = mE_x$ nel campo elettrico E_x , e sono quindi soggetti alla forza di *Lorentz* $F_L = qv_dB$, che agisce nel verso delle y negative.

Essi quindi tendono ad accumularsi sulla faccia del semiconduttore perpendicolare all'asse y .

Questo accumulo di cariche porta alla formazione di una differenza di potenziale V_H fra le due facce del campione perpendicolari all'asse y , e quindi di un campo elettrico E_H tale che la forza elettrica qE_H sia uguale ed opposta alla forza di *Lorentz*, cioè $E_H = \mu E_x B$.

Ricordando le definizioni di campo elettrico, di resistività r e la legge di *Ohm*, si ottengono le relazioni

- $V_H = E_H/b$,
- $E_x = V_x/l = RI_x/l$,
- $R = r(l/bc)$,

che forniscono $V_H = \mu(r/c)I_xB$. Si vede quindi che la tensione di *Hall* è proporzionale al campo magnetico, e alla densità di corrente, tramite un coefficiente che include la mobilità dei portatori di carica μ , la resistività r e lo spessore del campione c .

A.2 Principio di funzionamento delle celle di carico

La cella di carico è un trasduttore in grado di convertire un peso o una forza applicata lungo il proprio asse, in un segnale elettrico che risulta proporzionale alla deformazione causata dalla forza sulla parte meccanica dello stesso.

La cella di carico è un corpo metallico elastico a cui vengono applicati uno o più estensimetri. Gli estensimetri sono delle piccole griglie costituite da

A.2 Principio di funzionamento delle celle di carico

filamenti di costantana¹ che, incollati in opportune posizioni della struttura della cella di carico, sono in grado di seguirne perfettamente la deformazione modificando di conseguenza la propria resistenza elettrica. Questa variazione di resistenza viene convertita in un segnale elettrico, grazie alla realizzazione di un circuito elettrico denominato *Ponte di Wheatstone* figura(A.2), che

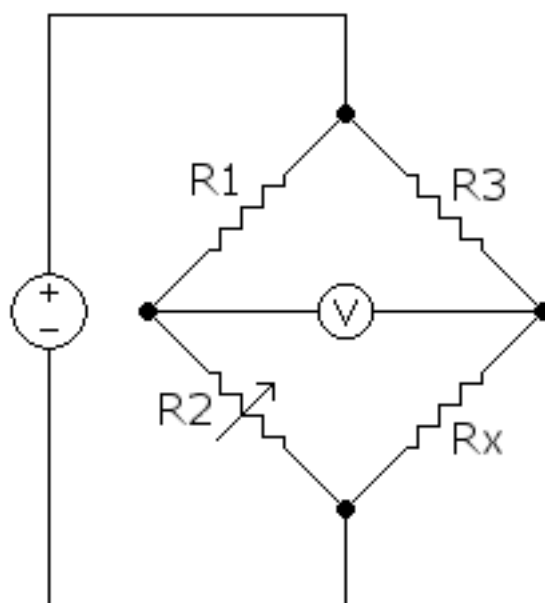


Figura A.2: Schema di un Ponte di Wheatstone.

collega tra loro 2 o più estensimetri. Il segnale è poi elaborato mediante un algoritmo per calcolare la forza applicata al trasduttore. È richiesta la correzione delle non linearità, calibrazione, compensazione delle variazioni dovute alla temperatura, ecc.

Il segnale proveniente dalla cella di carico, è comunque dell'ordine di pochi mV per cui è necessaria un'ulteriore amplificazione ottenuta con apposite strumentazioni utilizzate nel nostro dispositivo.

¹La costantana è una lega binaria composta di rame (60%) e di nichel (40%) che presenta, a temperatura ambiente, una resistività di circa $50 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$. Viene utilizzata in ambito elettrotecnico per la realizzazione di resistori.

Appendice B

Descrizione dell'elettronica di controllo

B.1 Introduzione

Ai fini dell'attuazione del dispositivo multi finger abbiamo creato un Box contenente tutta l'elettronica.

Il Box come possiamo vedere in figura(foto box) è composto da:

- tre elettrovalvole;
- tre amplificatori di segnale per le celle di carico.
- un alimentatore;

B.2 Elettrovalvole

Per il controllo continuo della pressione pneumatica in base ad un segnale elettrico abbiamo utilizzato tre elettrovalvole serie ITV2000 della SMC (figura(B.1)) .

B.2.1 Principi di funzionamento

Il funzionamento dell'elettrovalvola riferendoci alla figura(B.2) può essere

Capitolo B. Descrizione dell'elettronica di controllo



Figura B.1: Elettrovalvola ITV2000

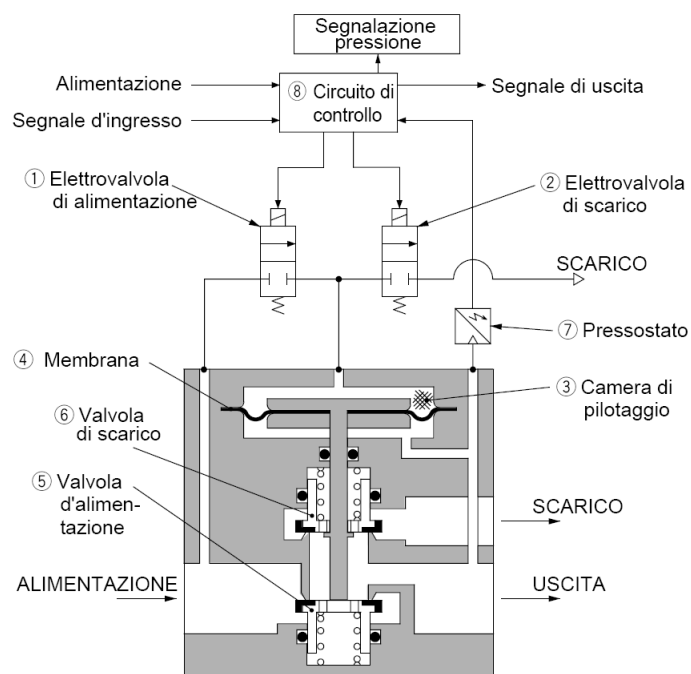


Figura B.2: Diagramma di funzionamento delle elettrovalvole

B.2.2 Caratteristiche tecniche

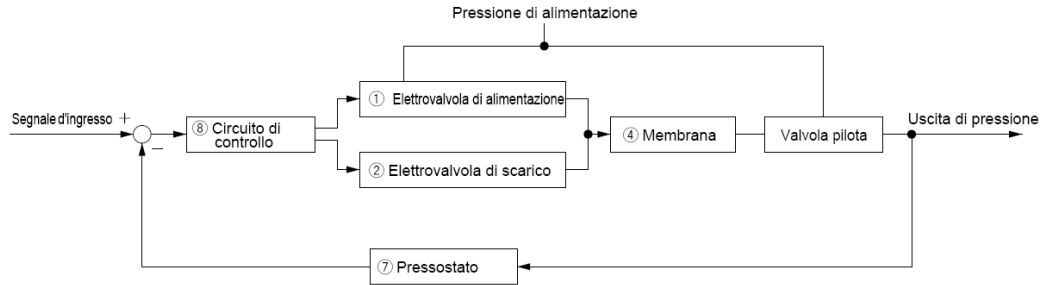


Figura B.3: Diagramma a blocchi delle elettrovalvole

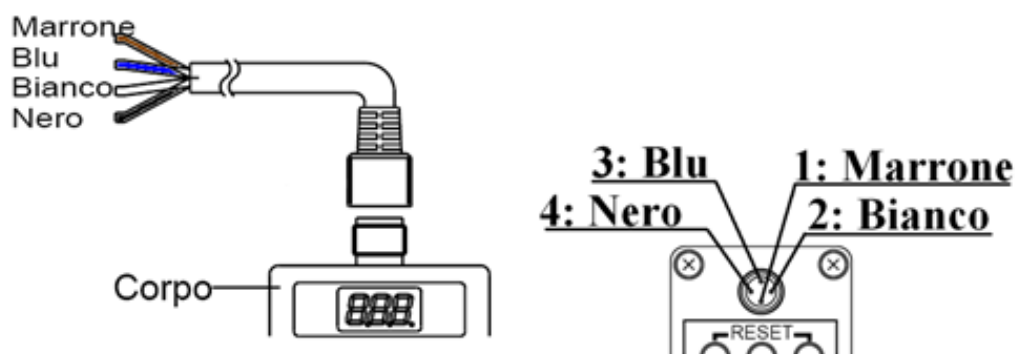
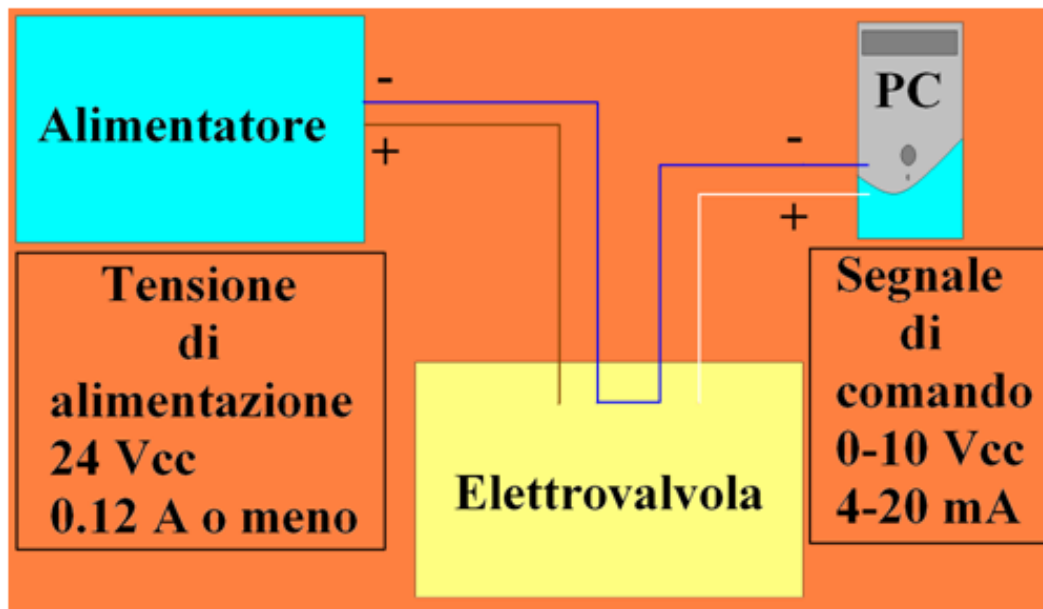
così schematizzato: quando il segnale di ingresso aumenta, l'elettrovalvola di alimentazione pneumatica (1) si attiva e l'elettrovalvola di scarico (2) viene chiusa. Di conseguenza, l'aria passa attraverso l'elettrovalvola di alimentazione pneumatica (1) e viene messa in comunicazione con la camera di pilotaggio (3). La pressione all'interno della valvola di pilotaggio (3) generando in quest'ultima una depressione che aumenta e agisce sulla superficie superiore del diaframma (4). Di conseguenza, la valvola di alimentazione (5) collegata al diaframma (4) si apre, e una parte della pressione di alimentazione diventa pressione d'uscita. Questa pressione d'uscita ritorna al circuito di controllo (8) mediante il sensore di pressione (7). Qui una funzione di correzione agisce fino a rendere la pressione d'uscita proporzionale al segnale d'ingresso, in modo da ottenere una pressione d'uscita proporzionale al segnale di comando.

B.2.2 Caratteristiche tecniche

Le elettrovalvole serie ITV2000 hanno le seguenti dimensioni di ingombro: *altezza* = 126mm comprensiva del connettore dei cavi elettrici e della base di ancoraggio, *larghezza* = 50mm e *profondità* = 50mm.

Per quanto riguarda l'elettronica, queste valvole richiedono una tensione di alimentazione di 24VCC e una corrente di alimentazione $\leq 0.12A$, invece per il segnale di comando necessitano di una tensione di 0 ÷ 10VCC e una corrente di 4 ÷ 20mA come si può vedere schematicamente in figura(B.4).

Per il circuito di pressione abbiamo realizzato un ingresso sul pannello



1	Marrone	Alimentazione
2	Bianco	Segnale in entrata
3	Blu	GND (COMUNE)
4	Nero	Uscita monitor

Figura B.4: Circuito elettrico delle elettrovalvole

B.3 Amplificatori per le Celle di carico

posteriore mediante un raccordo ad innesto rapido che riceve aria compressa da un compressore esterno al sistema. Dal raccordo ad innesto rapido la pressione viene inviata ad un raccordo a 4 vie una di ingresso e tre d'uscita. Da le tre vie d'uscite l'aria proveniente dal compressore raggiunge le tre elettrovalvole che inviano la pressione controllata a tre connettori ad innesto rapido posti sul pannello anteriore del Box. Infine da questi tre raccordi la pressione controllata raggiunge i tre CASR del dispositivo multi finger.

B.3 Amplificatori per le Celle di carico

Come abbiamo visto nel paragrafo(A.2) il segnale che esce dalle celle di carico e dell'ordine di pochi mV, quindi per poter utilizzare questo segnale è necessario amplificarlo. Per questo sono stati acquistati 3 amplificatori (uno per ogni cella) della Dseurope srl della serie EL-525.

Bibliografia

- [1] G. Ambrosi, A. Bicchi, D. De Rossi, E. P. Scilingo, *The Role of Contact Area Spread Rate in Haptic Discrimination of Softness*.
- [2] S. Barone, C. Culla, L. Piccinini [http:// www2.ing.unipi.it/ didattica/corsocad3d/home.htm](http://www2.ing.unipi.it/didattica/corsocad3d/home.htm)
- [3] Barsali, Sergio *Lezioni di disegno di macchine / Sergio Barsali, Gian Carlo Barsotti, Umberto Rosa* 2a ed. Lucca : San Marco, stampa 1993
- [4] M. Beghini and C. Santus. *Generalization of the hertz theory in plane strain conditions for cubic profiles*. DIMNP - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione - Facoltà di Ingegneria Università di Pisa.
- [5] A. Bicchi *Fondamenti di Automatica - I Parte*
- [6] A. Bicchi *Fondamenti di Automatica - II Parte*
- [7] A. Bicchi, E.P. Scilingo, D. Dente, and N. Sgambelluri. *Tactile Flow and Haptic Discrimination of Softness*. In F. Barbagli, D. Prattichizzo, and K. Salisbury, editors, *Multi-point Interaction with Real and Virtual Objects*, number 18 in STAR - Springer Tracts in Advanced Robotics, pages 165-176. Springer Verlag, 2005.
- [8] C. Carmignani, *Dinamica strutturale / Costantino Carmignani* Pisa : ETS, c2001.
- [9] S. Chiaverini, F. Caccavale, L. Villani e L. Sciavicco, *Fondamenti di sistemi dinamici*, McGraw-Hill, Milano 2003.

BIBLIOGRAFIA

- [10] E. Fornasini e G. Marchesini, *Appunti di Teoria dei Sistemi*, Edizioni Libreria Progetto, Padova 1994.
- [11] J. J. Gibson *The perception of the visual world*, Boston Houghton Mifflin, 1950. 2. Barron J.L., Fleet D. J. and Beauchemin S. S.: Performance of Optical Flow Techniques. *IJCV* (1994), 43-77.
- [12] E. B. Goldstein *The Cutaneous Senses Ch.14, Sensation and Perception* 3rd Ed., Wadsworth Publishing Company (Belmont CA, reprinted 1989).
- [13] K. L. Johnson *Contact Mechanics*, Cambridge University Press 1999.
- [14] G. Marro, *Controlli Automatici*, Zanichelli, Bologna 1992. G. Marro, *Complementi di controlli automatici*, Zanichelli, Bologna 1994.
- [15] R. Nordmann, H. Birkhofer Curatore edizione italiana: Enrico Manfredi *Elementi di macchine e mecatronica - Progettazione dei sistemi tecnici*.
- [16] G. Pahl, W. Beitz, *Engineering design: a systematic approach*, 2nd. ed., Springer, 1996 Zanichelli, Bologna 1994.
- [17] E. P. Scilingo, N. Sgambelluri, D. De Rossi, and A. Bicchi. *Towards a Haptic Black Box: Magnetorheological fluid based display for softness and shape discrimination*. In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, pages 2412-2417, May 2003.
- [18] <http://www.dseurope.it/ita/detail.qws?prodotto=6>
- [19] <http://www.fgp-instrumentation.com>
- [20] <http://www-lar.deis.unibo.it/aida/B-mod-unisi-it.htm>
- [21] <http://www-lar.deis.unibo.it/aida/B-mod-unibo-it.htm>