

Università di Pisa  
Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea in Ingegneria Robotica e dell'Automazione



# Esame di Meccanica dei Robot

## PROGETTO *Studio e simulazione in ambiente Adams della Pisa-IIT Softhand*

Cristina Piazza

Anno Accademico 2012-2013

# Capitolo 1

## Introduzione

L'obiettivo di questo progetto è lo studio e l'implementazione di un modello di equazioni che permettano di descrivere la meccanica di una mano robotica sottoattuata, concentrandosi in particolar modo sulla Pisa-IIT Softhand mostrata in Fig. 1.1.



**Figura 1.1:** Pisa-IIT Softhand

La Pisa-IIT Softhand è una mano robotica a 5 dita, ciascuna costituita dalla medesima struttura: una catena di coppie di giunti rotoideali disposti in parallelo tra loro, che consentono i movimenti di flessione-estensione e un giunto posto perpendicolarmente rispetto al palmo, che permetta i movimenti di abduzione-adduzione. Il pollice ha una coppia di giunti di flessione-estensione in meno rispetto alle altre dita e non è dotato del giunto di abduzione-adduzione. Inoltre è ruotato in due dimensioni rispetto al palmo, a differenza delle altre dita, che sono disposte in modo parallelo tra di loro. Anche nel palmo sono presenti dei giunti dello stesso tipo (sempre paralleli al palmo ma ruotati di  $90^\circ$  rispetto a quelli delle falangi) che permettono di attuare anche il movimento dell'arco palmare durante la presa.

Le principali caratteristiche di questa mano sono dunque la sua grande modularità e semplicità nella struttura, la totale assenza di elementi di connessione di tipo meccanico

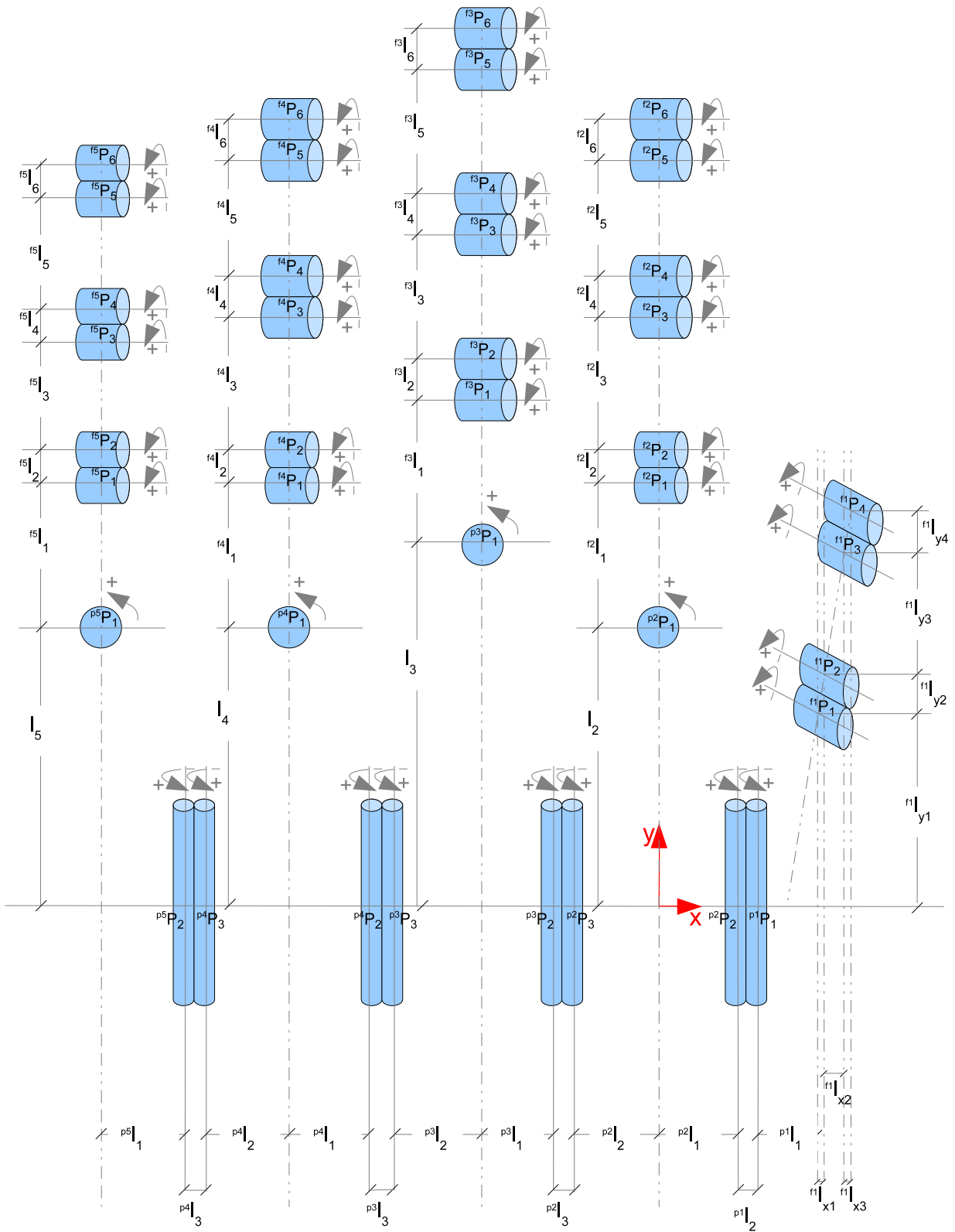
quali viti o bulloni, l'impiego di un unico tendine che percorre tutta la mano e che permette così la completa attuazione sfruttando un solo motore.

La presenza di un solo motore, unito alle sue caratteristiche di adattabilità la rende capace di compiere uno svariato numero di prese di oggetti di diversa forma e dimensione.

Questa mano robotica può essere vista come una catena cinematica di giunti connessi tra loro, il cui schema cinematico è mostrato in Fig.1.2.

Le distanze tra gli assi dei vari giunti e con il sistema di riferimento sono indicate con  ${}^{f_k, p_k}l_{\{i\}}$ . L'apice  $f_k$  indica che la lunghezza è riferita al  $k$ -esimo dito mentre l'apice  $p_k$  indica che la lunghezza è riferita al palmo del  $k$ -esimo dito.

Con  ${}^{f_k, p_k}P_{\{i\}}$  vengono indicati dei punti appartenenti all'asse di ciascun giunto, che ci aiuteranno nello studio della cinematica della mano. Come per le lunghezze, con l'apice  $f_k$  ci si riferisce al  $k$ -esimo dito mentre con l'apice  $p_k$  al palmo del  $k$ -esimo dito.



**Figura 1.2:** Schematizzazione della Pisa-IIT Softhand. Può essere vista come una catena di giunti puramente rotoidali

# Capitolo 2

## Modello per un dito

La struttura modulare che caratterizza la Pisa-IIT Softhand consente di affrontare e sviluppare in partenza lo studio di un modello di equazioni per un generico dito, che successivamente potrà essere esteso facilmente a tutta la mano.

### 2.1 Equazioni per un dito

Ciascun dito è costituito da una successione di giunti dello stesso tipo. Si tratta di una versione modificata di giunti di Hillberry, i quali possono essere visti come un insieme di due semplici giunti rotoidali in contatto di rotolamento tra loro. Quindi, l'analisi e lo studio del modello per un generico dito partirà con la considerazione e semplificazione che esso sia costituito da una serie di giunti puramente rotoidali.

La prima relazione fondamentale da prendere in considerazione è quella che lega la velocità ai giunti (indicata con  $\dot{q}$ ) con la velocità dell'end effector (indicata con  $v$ ) tramite lo Jacobiano, ovvero

$$v = J(q)\dot{q}. \quad (2.1)$$

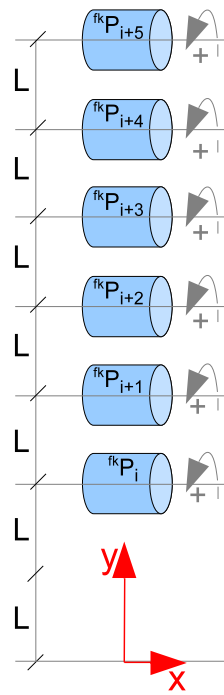
Lo Jacobiano è stato calcolato a partire dai twist ricavati per ciascun giunto, calcolati tramite prodotto di esponenziali, come mostrato in ??

$$J(q) = [\xi_1 \quad \xi'_2 \quad \dots \quad \xi'_n] \quad (2.2)$$

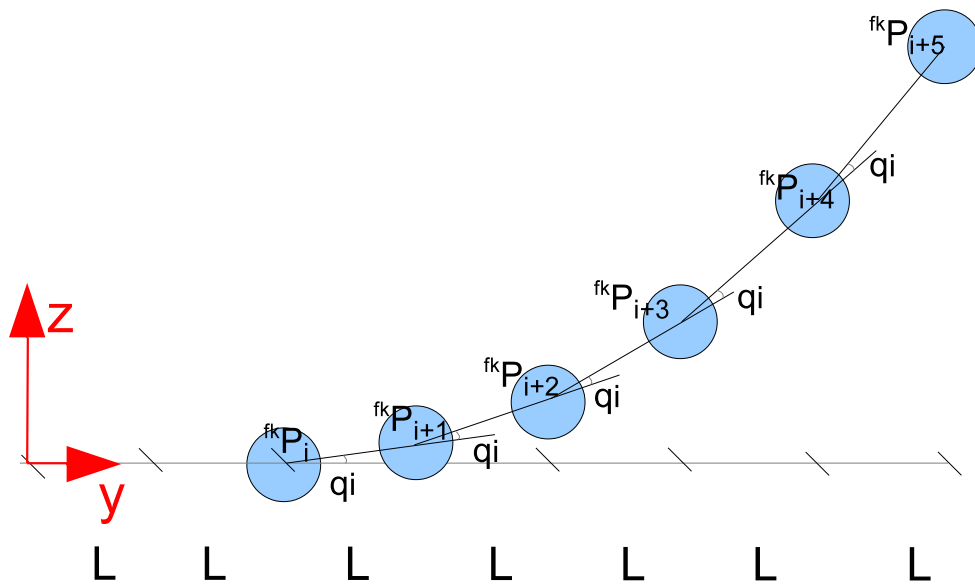
dove, trovandoci in presenza di sole coppie rotoidali la  $\xi_i$  è nella forma

$$\xi_i = \begin{bmatrix} -\omega_i \times p_i \\ \omega_i \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

in cui  $\omega_i$  è il vettore della velocità del giunto e  $p_i$  è un punto nell'asse di rotazione del giunto.



**Figura 2.1:** Schema semplificato di un dito - vista frontale. In prima analisi può essere visto come una successione di singoli giunti rotoidali



**Figura 2.2:** Schema semplificato di un dito - vista laterale.

Le  $\xi'_n$  si ricavano a partire dalle  $\xi_i$  tramite la seguente espressione

$$\xi'_n = Ad_{(e^{\xi_1 q_1} \dots e^{\xi_{(n-1)} q_{(n-1)}})} \xi_n. \quad (2.4)$$

Con il termine  $Ad$  si indica la matrice aggiunta.

Lo Jacobiano così calcolato è definito Spatial Manipulator Jacobian. Ogni colonna dello Spatial Manipulator Jacobian corrisponde al twist del giunto scritto rispetto alla terna base. È possibile calcolare anche il Body Manipulator Jacobian, le cui colonne corrispondono ai twist calcolati rispetto al frame locale.

Il Body Manipulator Jacobian e lo Spatial Manipulator Jacobian sono legati dalla seguente relazione

$$J_s(q) = Ad_g J_b(q) \quad (2.5)$$

in cui

$$Ad_g = Ad(e^{\xi_1 q_1} \dots e^{\xi_n q_n} g_0) \quad (2.6)$$

e

$$g_0 = \begin{bmatrix} I & P_{ee} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

con  $P_{ee}$  coordinate dell'end-effector.

Lo Jacobiano calcolato per un generico dito  $f_k$  costituito da 6 giunti rotoidali, come quello mostrato in Fig.2.1 risulta essere

$${}^{f_k}J(q) = [\xi_1 \quad \xi'_2 \quad \xi'_3 \quad \xi'_4 \quad \xi'_5 \quad \xi'_6] \quad (2.8)$$

Nell'implementazione in Matlab per il calcolo dello Jacobiano per un dito a 6 giunti rotoidali sono stati posti i centri di ciascun giunto ad una distanza  $L$  di 12mm l'uno dall'altro ed è stata scelta una configurazione di partenza non completamente stesa, ma con una  $q_i = 5^\circ$  per ciascun giunto, come mostrato in Fig.2.2.

Lo Spatial Manipulator Jacobian e il Body Manipulator Jacobian risultano essere i seguenti

$$J_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0838 & 5.1896 & 9.2939 & 14.3653 & 20.3653 \\ -24.0000 & -35.8177 & -47.4088 & -58.6851 & -69.5608 & -79.9531 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$J_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -26.3653 & -24.2815 & -21.1757 & -17.0715 & -12.0000 & -6.0000 \\ 294.9759 & 283.1582 & 271.5671 & 260.2908 & 249.4151 & 239.0228 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Per lo sviluppo di questo modello verrà utilizzato il Body Manipulator Jacobian, e sarà indicato semplicemente con  $J$ .

Differenziando l'Eq.(2.1) otteniamo

$$v\partial t = J(q)\partial q; \quad (2.11)$$

ma è noto che

$$\partial C = v\partial t, \quad (2.12)$$

dove con  $C$  si indicano gli spostamenti nel punto di contatto.

Dunque sostituendo l'Eq.(2.12) nell'Eq.(2.11) si ottiene

$$\partial C = J(q)\partial q. \quad (2.13)$$

Trovata questa prima relazione dobbiamo adesso ricavare la sua duale. In condizioni di equilibrio, la dualità cineto-statica ci permette di imporre un'uguaglianza tra il lavoro compiuto ai giunti e il lavoro compiuto all'elemento terminale. Il lavoro compiuto ai giunti è pari a

$$W_j = \tau^T \partial q, \quad (2.14)$$

dove le  $\tau$  sono le coppie ai giunti.

Il lavoro compiuto all'end-effector è

$$W_{ee} = f_c^T \partial C, \quad (2.15)$$

dove  $f_c$  è il vettore delle forze nel punto di contatto.

Dall'uguaglianza si otterrà

$$f_c^T \partial C = \tau^T \partial q \quad (2.16)$$

da cui, sostituendo l'Eq.(2.13) nella l'Eq.(2.16)

$$\tau = J(q)^T f_c. \quad (2.17)$$

Linearizzando l'Eq.(2.17) mediante lo sviluppo in serie di Taylor, otterremo

$$\partial \tau = Q\partial q + U\partial f. \quad (2.18)$$

in cui i termini  $Q$  e  $U$  rappresentano

$$Q = \frac{\partial J(q)^T f}{\partial q} \quad (2.19)$$

e

$$U = \frac{\partial J(q)^T f}{\partial f} = J(q)^T. \quad (2.20)$$

Imponiamo dunque il sistema tra l'Eq.(2.13) e l'Eq.(2.18)

$$\begin{cases} \partial C - J\partial q = 0 \\ \partial \tau - Q\partial q - J(q)^T \partial f = 0 \end{cases}$$

che rappresenta un primo risultato per il nostro studio.



## 2.2 Studio del giunto di Hillberry

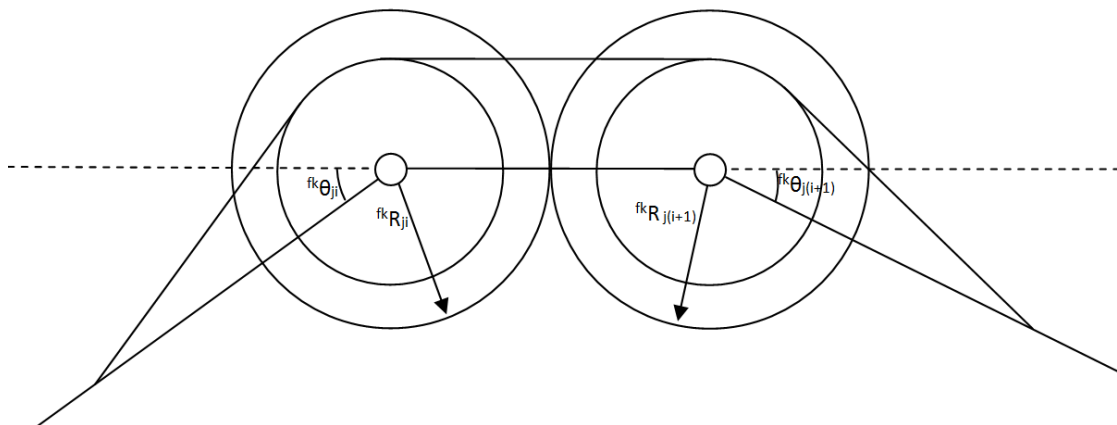
Il giunto utilizzato nella Pisa-IIT Softhand è una versione modificata del giunto di Hillberry, che consiste in una coppia di cilindri in contatto di rotolamento l'uno sull'altro, come mostrato in Fig.2.3



**Figura 2.3:** Giunto di Hillberry

Ciascuna di queste due parti può essere vista come un giunto rotoidale. La scelta è ricaduta su questo tipo di giunto perchè presenta i seguenti vantaggi:

- Il range di rotazione è di circa  $180^\circ$ , che copre abbondantemente quello di cui necessita la mano, ovvero al massimo  $90^\circ$ ;
- Le dimensioni di questo giunto possono essere ridotte senza troppa difficoltà e senza modificarne il principio di funzionamento;
- Non necessita di elementi di connessione di tipo meccanico, come viti o bulloni;
- Ha un basso attrito;
- La sua particolare struttura consente di variare facilmente le dimensioni dei diametri, cambiando così i rapporti di trasmissione nel giunto e dunque la forza trasmessa.



**Figura 2.4:** Schema di un giunto di Hillberry

puleggia  $(i + 1)$ -esima di raggi rispettivamente  ${}^f k R_{j_i}$  e  ${}^f k R_{j_{(i+1)}}$ .

$$f_k \theta_{j_i}^{f_k} R_{j_i} = f_k \theta_{j_{(i+1)}}^{f_k} R_{j_{(i+1)}} \quad (2.21)$$

da cui

$$f_k \theta_{j_i} = \frac{f_k R_{j(i+1)} f_k \theta_{j(i+1)}}{f_k R_{j_i}} \quad (2.22)$$

o allo stesso modo

$$f_k \theta_{j(i+1)} = \frac{f_k R_{j_i} f_k \theta_{j_i}}{f_k R_{j(i+1)}} \quad (2.23)$$

## 2.3 Studio del sistema di attuazione

Essendo in presenza di un sistema modulare, anche per quanto riguarda lo studio del sistema di attuazione è possibile semplificare l'analisi procedendo inizialmente con lo studio delle equazioni per un generico modulo, ed estendendole successivamente all'intero sistema. La notazione utilizzata è quella visibile in Fig.2.5, dove sono rappresentati due generici link vincolati al rotolamento tramite una coppia di pulegge di giunto.

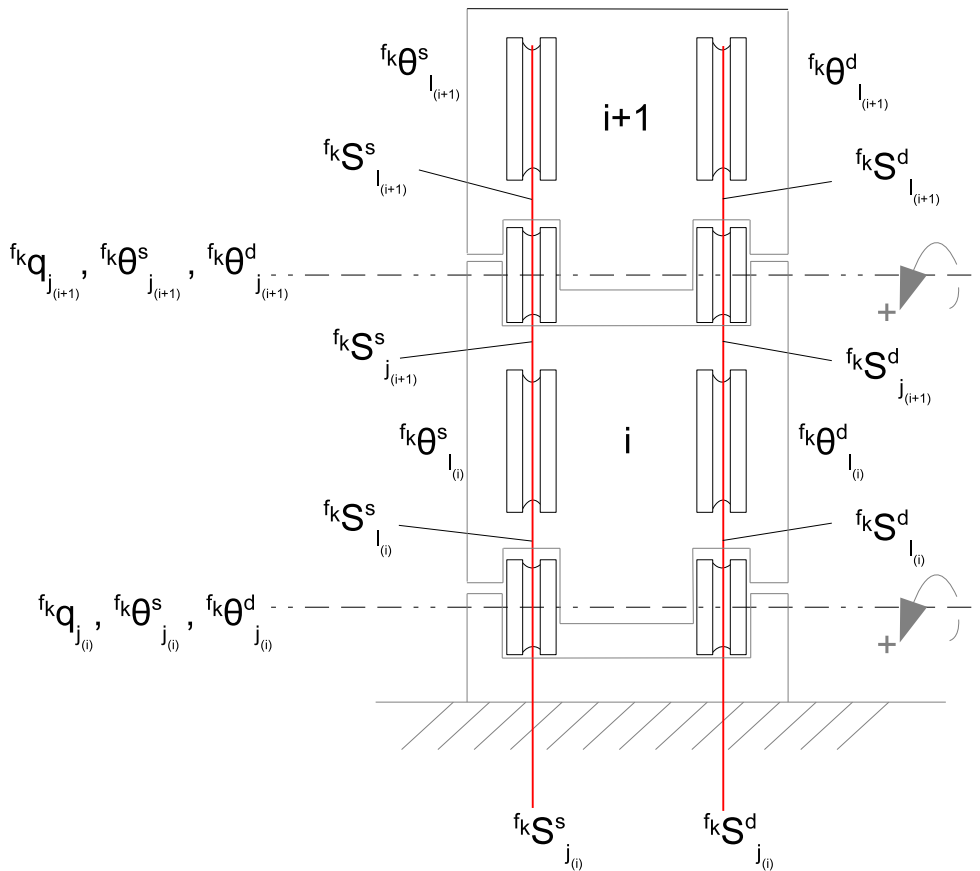


Figura 2.5

Ciascun elemento è indicato attraverso una forma di questo tipo  $f_k A_{\{l_{(i)}, j_{(i)}\}}^{\{s, d, t\}}$ . L'apice a sinistra,  $f_k$  (con  $k = 1, ..n$ ), individua il dito di appartenenza, mentre gli apici a destra,  $s, d$  e

$t$ , indicano il gruppo di pulegge preso in considerazione (se appartenenti al lato sinistro, destro o top). Il pedice  $l_{(i)}$  viene utilizzato per indicare un elemento solidale al link  $i$ -esimo, mentre il pedice  $j_{(i)}$  per un elemento solidale al giunto del link  $i$ -esimo.

L'intero sistema che andremo ad analizzare è un generico dito, costituito da  $n$  link, come in Fig. 2.6. Il percorso che il tendine compie lungo il dito è stato indicato in rosso.

La parte sinistra e la parte destra sono connesse tra loro tramite una puleggia denominata top.

Appare come un sistema complesso ma gli  $n$  link che lo compongono hanno la medesima conformazione, per cui è possibile semplificare l'analisi iniziando con lo studio di una prima parte del sistema e procedendo con l'inserimento di un elemento per volta.

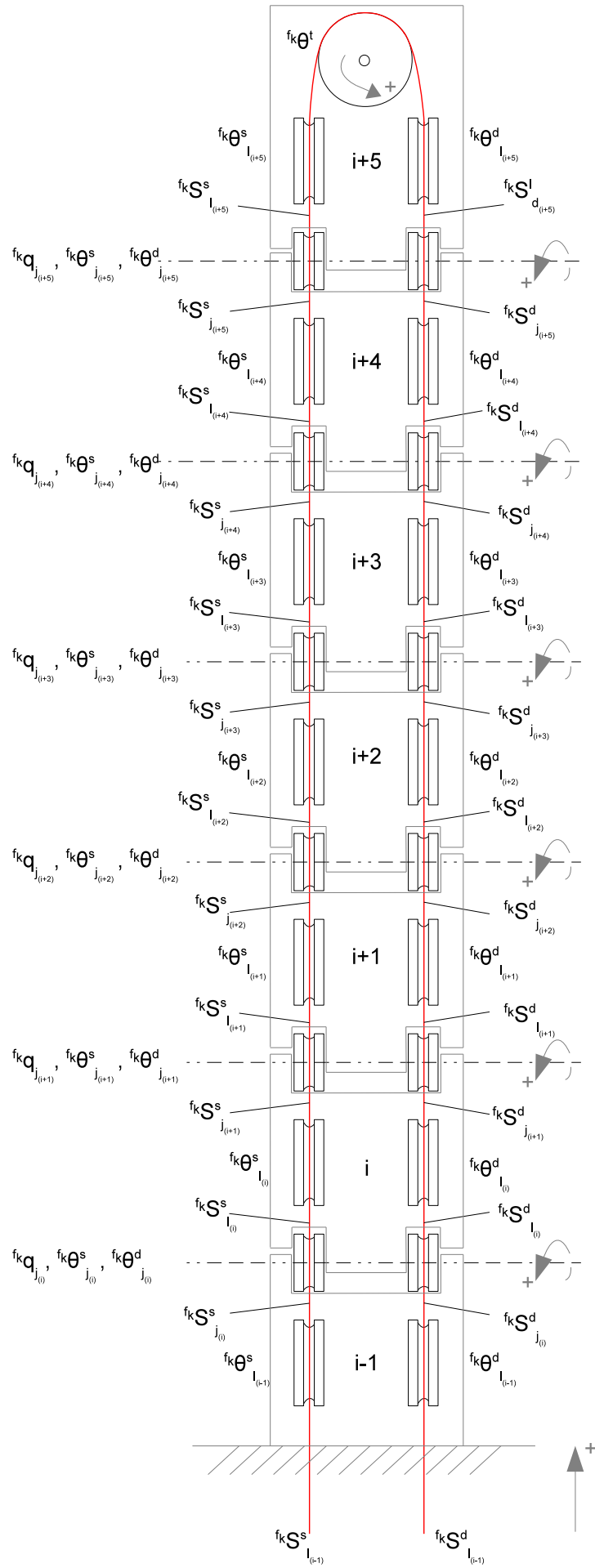
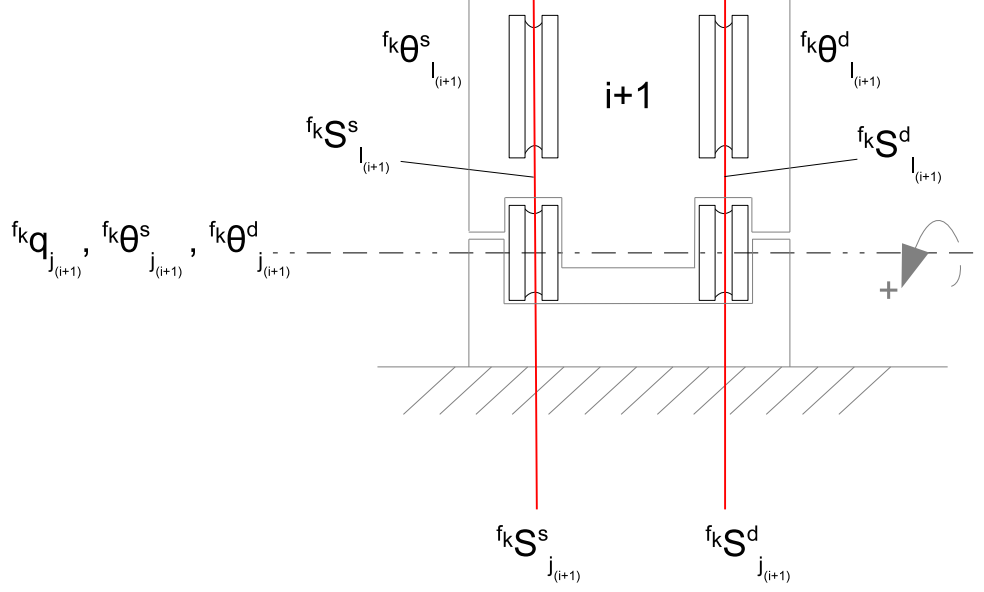


Figura 2.6

Per cominciare supponiamo di analizzare un sistema semplice, come quello mostrato in Fig. 2.7.



**Figura 2.7**

Si possono immediatamente ricavare i due spostamenti del tendine  ${}^{f_k}S_{l(i+1)}^s$  e  ${}^{f_k}S_{l(i+1)}^d$

$${}^{f_k}S_{l(i+1)}^s = -{}^{f_k}r_{l(i+1)}^s {}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^s \quad (2.24)$$

e

$${}^{f_k}S_{l(i+1)}^d = -{}^{f_k}r_{l(i+1)}^d {}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^d. \quad (2.25)$$

Ma, come mostrato in Fig. 2.8, la parte sinistra e destra del sistema sono connesse tra loro tramite la puleggia top, per cui procediamo valutando che contributo darà questo elemento al sistema preso in considerazione.

L'angolo di rotazione  ${}^{f_k}\theta^t$  può essere valutato in funzione dell'angolo  ${}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^s$

$$-{}^{f_k}\theta^t = -\frac{{}^{f_k}r_{l(i+1)}^s}{{}^{f_k}r^t} {}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^s \quad (2.26)$$

dunque

$${}^{f_k}\theta^t = \frac{{}^{f_k}r_{l(i+1)}^s}{{}^{f_k}r^t} {}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^s. \quad (2.27)$$

Procedendo allo stesso modo nell'analisi di  ${}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^d$  si avrà

$${}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^d = -\frac{{}^{f_k}r^t}{{}^{f_k}r_{l(i+1)}^d} {}^{f_k}\theta^t. \quad (2.28)$$

Tenendo presente i valori degli spostamenti  ${}^{f_k}S_{l(i+1)}^s$  e  ${}^{f_k}S_{l(i+1)}^d$  ricavati nella (3.1) e nella (3.19), e sostituendo quanto ricavato dalla (2.27) nella (2.28)

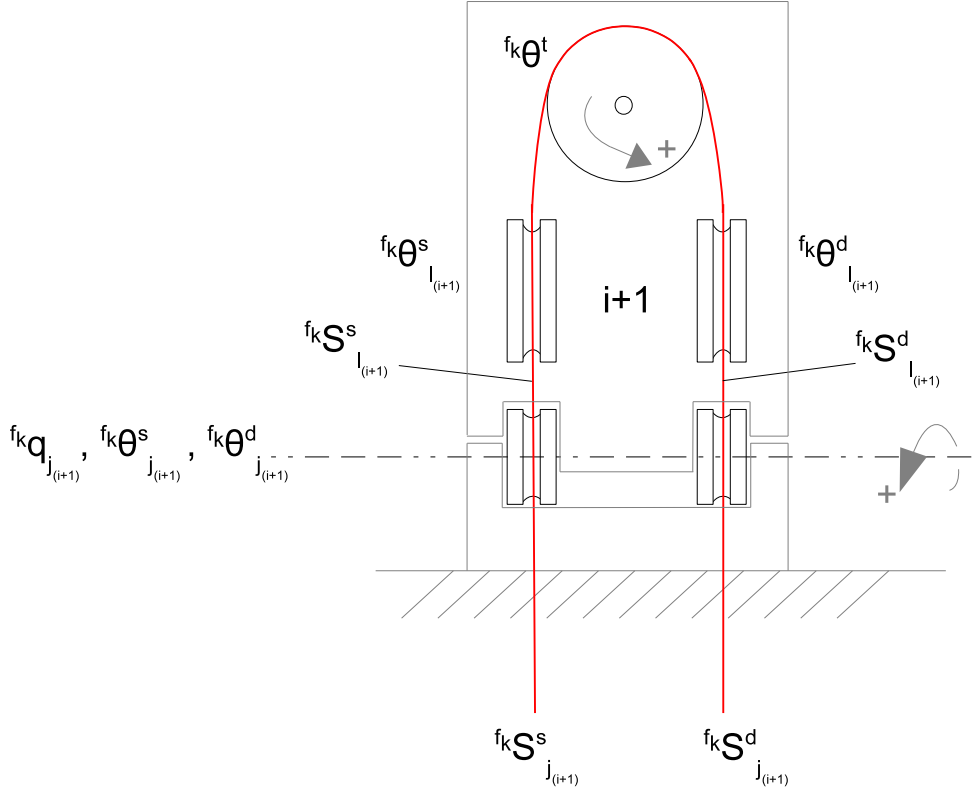


Figura 2.8

$$\begin{aligned}
 f_k S_{l(i+1)}^d &= -f_k r_{l(i+1)}^d f_k \theta_{l(i+1)}^d = f_k r_{l(i+1)}^d \frac{f_k r^t}{f_k r_{l(i+1)}^d} f_k \theta^t = \\
 &= f_k r^t \frac{f_k r_{l(i+1)}^s}{f_k r^t} f_k \theta_{l(i+1)}^s = f_k r_{l(i+1)}^s f_k \theta_{l(i+1)}^s = -f_k S_{l(i+1)}^s.
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Dunque da questa prima analisi risulta

$$f_k S_{l(i+1)}^d = -f_k S_{l(i+1)}^s. \tag{2.30}$$

Adesso valutiamo il contributo della coppia di pulegge di giunto. Si ricavano i valori degli spostamenti  $f_k S_{j(i+1)}^s$  e  $f_k S_{j(i+1)}^d$  come prodotto tra i rispettivi raggi delle pulegge di giunto ( $f_k r_{j(i+1)}^s$  e  $f_k r_{j(i+1)}^d$ ) e gli angoli di avvolgimento ( $f_k \theta_{j(i+1)}^s$  e  $f_k \theta_{j(i+1)}^d$ ), ottenendo

$$f_k S_{j(i+1)}^s = -f_k r_{j(i+1)}^s f_k \theta_{j(i+1)}^s \tag{2.31}$$

e

$$f_k S_{j(i+1)}^d = -f_k r_{j(i+1)}^d f_k \theta_{j(i+1)}^d. \tag{2.32}$$

I valori degli angoli  $f_k \theta_{j(i+1)}^s$  e  $f_k \theta_{j(i+1)}^d$  possono essere calcolati applicando la Sovrapposizione degli Effetti, da cui otteniamo

$$f_k \theta_{j(i+1)}^s = f_k q_{j(i+1)} + \frac{f_k r_{l(i+1)}^s}{f_k r_{j(i+1)}^s} f_k \theta_{l(i+1)}^s = f_k q_{j(i+1)} - \frac{1}{f_k r_{j(i+1)}^s} f_k S_{l(i+1)}^s \tag{2.33}$$

$${}^{f_k}\theta_{j(i+1)}^d = {}^{f_k}q_{j(i+1)} + \frac{{}^{f_k}r_{l(i+1)}^d}{{}^{f_k}r_{j(i+1)}^d} {}^{f_k}\theta_{l(i+1)}^d = {}^{f_k}q_{j(i+1)} - \frac{1}{{}^{f_k}r_{j(i+1)}^d} {}^{f_k}S_{l(i+1)}^d \quad (2.34)$$

Andando a sostituire nella (2.31) e nella (2.32) i valori di  ${}^{f_k}\theta_{j(i+1)}^s$  e  ${}^{f_k}\theta_{j(i+1)}^d$  trovati, si ottiene

$${}^{f_k}S_{j(i+1)}^s = -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^s {}^{f_k}\theta_{j(i+1)}^s = -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^s \left( {}^{f_k}q_{j(i+1)} - \frac{1}{{}^{f_k}r_{j(i+1)}^s} {}^{f_k}S_{l(i+1)}^s \right) \quad (2.35)$$

e dunque

$${}^{f_k}S_{j(i+1)}^s = -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^s {}^{f_k}q_{j(i+1)} + {}^{f_k}S_{l(i+1)}^s. \quad (2.36)$$

$${}^{f_k}S_{j(i+1)}^d = -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^d {}^{f_k}\theta_{j(i+1)}^d = -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^d \left( {}^{f_k}q_{j(i+1)} - \frac{1}{{}^{f_k}r_{j(i+1)}^d} {}^{f_k}S_{l(i+1)}^d \right) \quad (2.37)$$

e dunque

$${}^{f_k}S_{j(i+1)}^d = -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^d {}^{f_k}q_{j(i+1)} + {}^{f_k}S_{l(i+1)}^d. \quad (2.38)$$

Sostituendo nella (2.38) la relazione tra  ${}^{f_k}S_{l(i+1)}^s$  e  ${}^{f_k}S_{l(i+1)}^d$  ricavata nella (2.30) e tenendo presente di quanto ricavato nella (2.36), si avrà

$$\begin{aligned} {}^{f_k}S_{j(i+1)}^d &= -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^d {}^{f_k}q_{j(i+1)} - {}^{f_k}S_{l(i+1)}^s = -{}^{f_k}r_{j(i+1)}^s {}^{f_k}q_{j(i+1)} - {}^{f_k}r_{j(i+1)}^d {}^{f_k}q_{j(i+1)} - {}^{f_k}S_{j(i+1)}^s = \\ &= -({}^{f_k}r_{j(i+1)}^s + {}^{f_k}r_{j(i+1)}^d) {}^{f_k}q_{j(i+1)} - {}^{f_k}S_{j(i+1)}^s. \end{aligned} \quad (2.39)$$

La (2.39) è quindi una prima relazione tra lo spostamento del tendine e la variabile di giunto  ${}^{f_k}q_{j(i+1)}$ .

Adesso procediamo aggiungendo al sistema una nuova coppia di pulegge, come in Fig. 2.9. Questo comporta l'inserimento di un nuovo modulo.

${}^{f_k}S_{j(i+1)}^s$  e  ${}^{f_k}S_{j(i+1)}^d$  sono gli spostamenti del tendine valutato dopo il giunto i+1 (rispettivamente per la parte sinistra e destra), mentre  ${}^{f_k}S_{l(i)}^s$  e  ${}^{f_k}S_{l(i)}^d$  sono gli spostamenti per l'intero sistema che stiamo considerando.

È possibile calcolare  ${}^{f_k}S_{j(i+1)}^s$  e  ${}^{f_k}S_{j(i+1)}^d$  rispetto alle pulegge  ${}^{f_k}p_{j(i)}^s$  e  ${}^{f_k}p_{j(i)}^d$

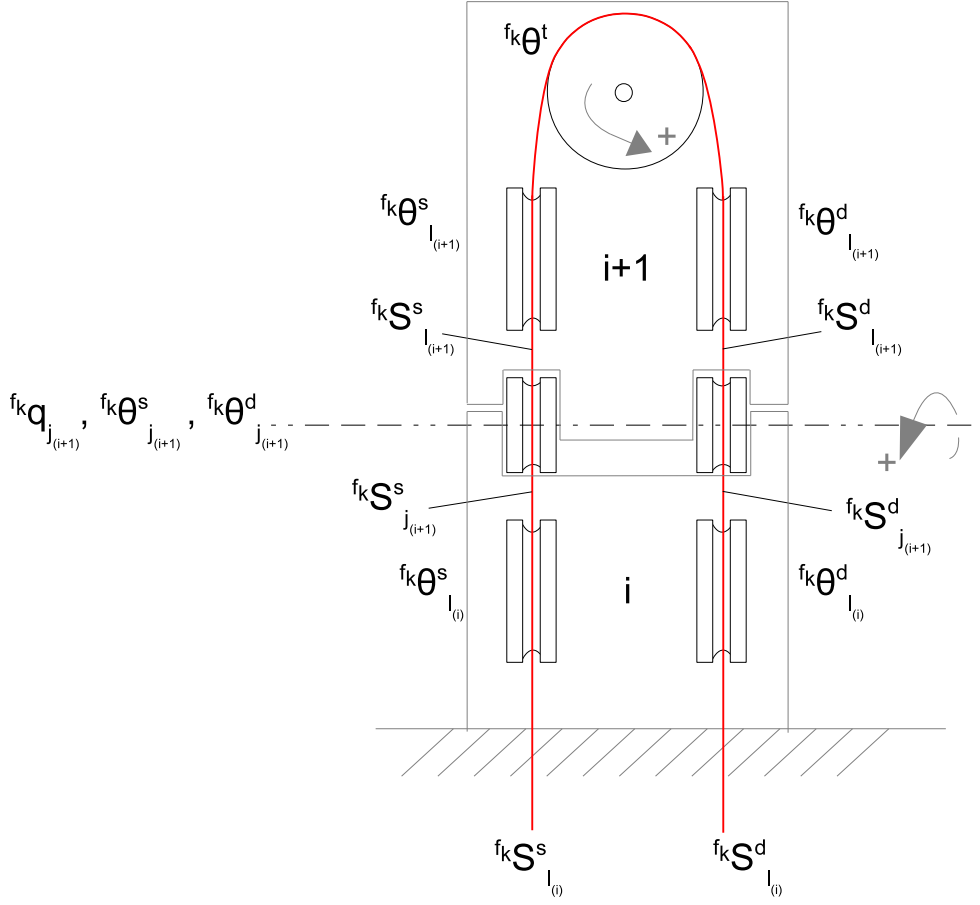
$${}^{f_k}S_{j(i+1)}^s = -{}^{f_k}r_{l(i)}^s {}^{f_k}\theta_{l(i)}^s \quad (2.40)$$

$${}^{f_k}S_{j(i+1)}^d = -{}^{f_k}r_{l(i)}^d {}^{f_k}\theta_{l(i)}^d. \quad (2.41)$$

Ma calcolando lo spostamento  ${}^{f_k}S_{l(i)}^s$  relativo alla puleggia  ${}^{f_k}p_{j(i)}^s$  si avrà

$${}^{f_k}S_{l(i)}^s = -{}^{f_k}r_{l(i)}^s {}^{f_k}\theta_{l(i)}^s. \quad (2.42)$$

Allo stesso modo è possibile calcolare  ${}^{f_k}S_{l(i)}^d$  relativo alla puleggia  ${}^{f_k}p_{j(i)}^d$



**Figura 2.9**

$$f_k S_{l(i)}^d = -f_k r_{l(i)}^d f_k \theta_{l(i)}^d. \quad (2.43)$$

Quindi si può concludere che

$$f_k S_{l(i)}^s = f_k S_{j(i+1)}^s \quad (2.44)$$

e

$$f_k S_{l(i)}^d = f_k S_{j(i+1)}^d \quad (2.45)$$

Inserendo un nuovo gruppo di pulegge di giunto avremo un sistema come da Fig. 2.10.

Ripercorriamo esattamente lo stesso ragionamento fatto per le pulegge del giunto (i+1).

Valutiamo il contributo di ciascuna puleggia di giunto. Si ricavano i valori degli spostamenti  $f_k S_{j(i)}^s$  e  $f_k S_{j(i)}^d$  come prodotto tra i rispettivi raggi delle pulegge di giunto ( $f_k r_{j(i)}^s$  e  $f_k r_{j(i)}^d$ ) e gli angoli di avvolgimento ( $f_k \theta_{j(i)}^s$  e  $f_k \theta_{j(i)}^d$ ), ottenendo

$$f_k S_{j(i)}^s = -f_k r_{j(i)}^s f_k \theta_{j(i)}^s \quad (2.46)$$

e

$$f_k S_{j(i)}^d = -f_k r_{j(i)}^d f_k \theta_{j(i)}^d. \quad (2.47)$$

Gli angoli  $f_k \theta_{j(i)}^s$  e  $f_k \theta_{j(i)}^d$  possono essere calcolati applicando la Sovrapposizione degli Effetti, da cui otteniamo



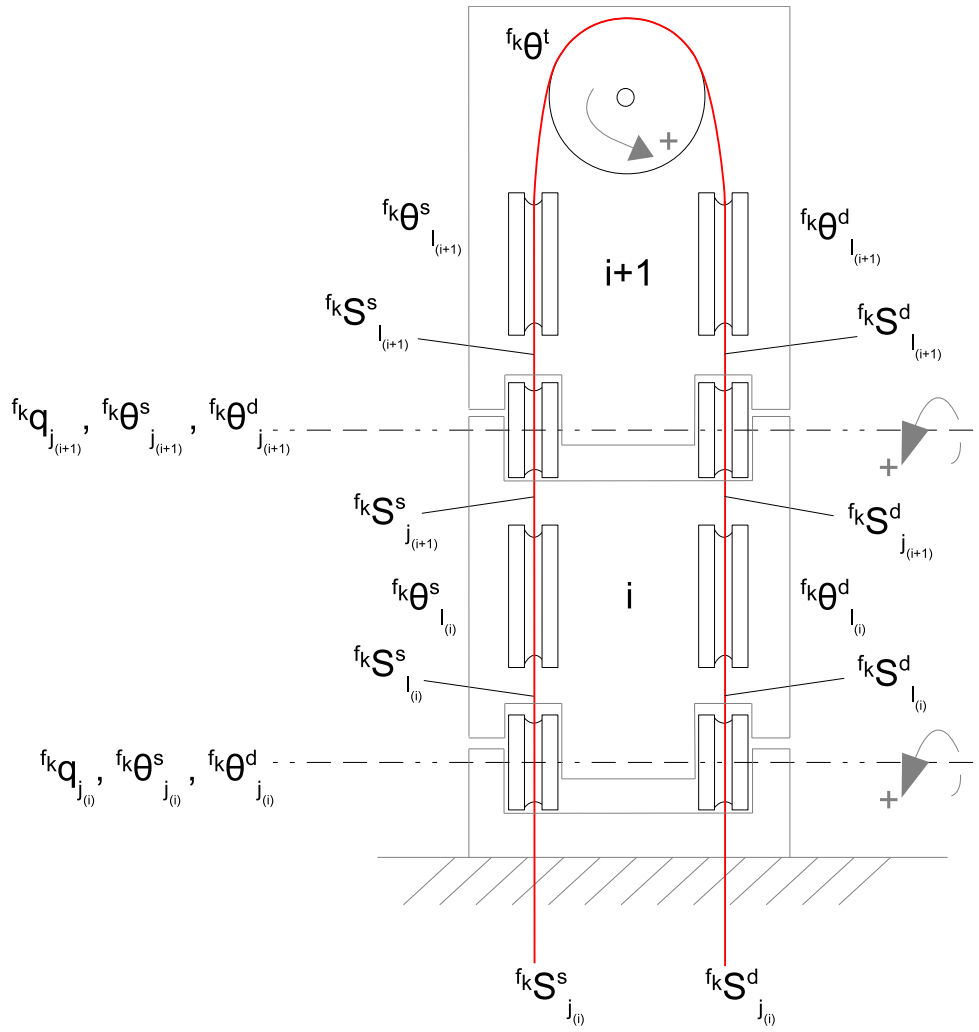


Figura 2.10

$$f_k \theta_{j(i)}^s = f_k q_{j(i)} + \frac{f_k r_{l(i)}^s}{f_k r_{j(i)}^s} f_k \theta_{l(i)}^s = f_k q_{j(i)} - \frac{1}{f_k r_{j(i)}^s} f_k S_{l(i)}^s \quad (2.48)$$

$$f_k \theta_{j(i)}^d = f_k q_{j(i)} + \frac{f_k r_{l(i)}^d}{f_k r_{j(i)}^d} f_k \theta_{l(i)}^d = f_k q_{j(i)} - \frac{1}{f_k r_{j(i)}^d} f_k S_{l(i)}^d \quad (2.49)$$

Andando a sostituire nella (2.46) e nella (2.47) i valori di  $f_k \theta_{j(i)}^s$  e  $f_k \theta_{j(i)}^d$  trovati, si ottiene

$$f_k S_{j(i)}^s = -f_k r_{j(i)}^s f_k \theta_{j(i)}^s = -f_k r_{j(i)}^s \left( f_k q_{j(i)} - \frac{1}{f_k r_{j(i)}^s} f_k S_{l(i)}^s \right) = -f_k r_{j(i)}^s f_k q_{j(i)} + f_k S_{l(i)}^s \quad (2.50)$$

$$f_k S_{j(i)}^d = -f_k r_{j(i)}^d f_k \theta_{j(i)}^d = -f_k r_{j(i)}^d \left( f_k q_{j(i)} - \frac{1}{f_k r_{j(i)}^d} f_k S_{l(i)}^d \right) = -f_k r_{j(i)}^d f_k q_{j(i)} + f_k S_{l(i)}^d. \quad (2.51)$$

Sostituendo nella (2.51), tenendo presente di quanto ricavato nella (2.44), (2.45) e (2.50), si avrà

$$f_k S_{j(i)}^d = -(f_k r_{j(i+1)}^s + f_k r_{j(i+1)}^d) f_k q_{j(i+1)} - (f_k r_{j(i)}^s + f_k r_{j(i)}^d) f_k q_{j(i)} - f_k S_{l(i)}^s. \quad (2.52)$$

Proseguendo nell'aggiunta dei link ci ritroveremo ad affrontare il medesimo problema, che per l'intero sistema dito, mostrato in Fig. 2.6, può quindi essere descritto per  $n$  link attraverso la seguente equazione

$${}^{f_k}S_{j(i+n)}^d = - \sum_{n=0}^{x-1} ({}^{f_k}r_{j(i+n)}^s + {}^{f_k}r_{j(i+n)}^d) {}^{f_k}q_{j(i+n)} - {}^{f_k}S_{j(i+n)}^s \quad (2.53)$$

dove  $x$  indica il numero di link di quel dito.

È possibile fare alcune considerazioni:

- se  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^s > 0$  e  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^d > 0$  (ovvero il tendine viene tirato da entrambe le estremità) si avrà

$${}^{f_k}S_{j(i+n)}^s + {}^{f_k}S_{j(i+n)}^d = - \sum_{n=0}^{x-1} ({}^{f_k}r_{j(i+n)}^s + {}^{f_k}r_{j(i+n)}^d) {}^{f_k}q_{j(i+n)} \quad (2.54)$$

e un link ruoterà rispetto al successivo;

- se  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^s > 0$  e  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^d < 0$  (ovvero il tendine viene tirato dal lato sinistro ma il lato destro è libero di scorrere) o viceversa, (cioè  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^s < 0$  e  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^d > 0$ ), allora tutte le variabili di giunto saranno pari a 0, per cui la (3.5) si riduce a

$${}^{f_k}S_{j(i+n)}^s = - {}^{f_k}S_{j(i+n)}^d \quad (2.55)$$

$${}^{f_k}S_{j(i+n)}^d = - {}^{f_k}S_{j(i+n)}^s \quad (2.56)$$

cioè il tendine scorre ma i link rimangono fermi;

- se  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^d = 0$  (ovvero il tendine viene tirato dall'estremità sinistra ma l'estremità destra è bloccata)

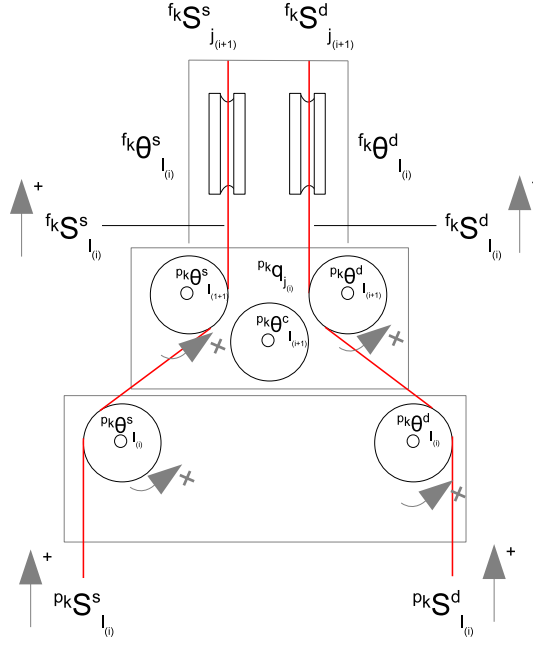
$${}^{f_k}S_{j(i+n)}^s = - \sum_{n=0}^{x-1} ({}^{f_k}r_{j(i+n)}^s + {}^{f_k}r_{j(i+n)}^d) {}^{f_k}q_{j(i+n)} \quad (2.57)$$

cioè un link si muove rispetto all'altro ma grazie al solo spostamento del tendine della parte sinistra;

- se  ${}^{f_k}S_{j(i+n)}^s = 0$  (ovvero il tendine viene tirato dal lato destro ma il lato sinistro è bloccato)

$${}^{f_k}S_{j(i+n)}^d = - \sum_{n=0}^{x-1} ({}^{f_k}r_{j(i+n)}^s + {}^{f_k}r_{j(i+n)}^d) {}^{f_k}q_{j(i+n)} \quad (2.58)$$

cioè un link si muove rispetto all'altro ma grazie al solo spostamento del tendine della parte destra.



**Figura 2.11:** Sistema di pulegge contenute nel palmo

Il filo passa da un dito al successivo attraverso un sistema di pulegge contenute del palmo, mostrato in Fig.2.11.

Quindi, studiamo il sistema di attuazione per un dito tenendo conto anche degli elementi presenti nel palmo

$${}^{f_k} S_{l_i}^d = -p_k r_{l_{(i+1)}}^d p_k \theta_{l_{(i+1)}}^d = p_k r_{l_i}^d p_k \theta_{l_i}^d = p_k S_{l_i}^d \quad (2.59)$$

ma

$${}^{f_k} S_{l_i}^d = -\sum_{n=0}^{x-1} ({}^{f_k} r_{j_{(i+n)}}^s + {}^{f_k} r_{j_{(i+n)}}^d) {}^{f_k} q_{j_{(i+n)}} - {}^{f_k} S_{l_i}^s. \quad (2.60)$$

Quindi

$${}^{f_k} S_{l_i}^s = -\sum_{n=0}^{x-1} ({}^{f_k} r_{j_{(i+n)}}^s + {}^{f_k} r_{j_{(i+n)}}^d) {}^{f_k} q_{j_{(i+n)}} - {}^{f_k} S_{l_i}^d \quad (2.61)$$

Infine

$${}^{f_k} S_{l_i}^s = p_k r_{l_{(i+1)}}^s p_k \theta_{l_{(i+1)}}^s = -p_k r_{l_i}^s p_k \theta_{l_i}^s = {}^{p_k} S_{l_i}^s \quad (2.62)$$

da cui nel complesso ottengo

$${}^{p_k} S_{l_i}^s = -\sum_{n=0}^{x-1} ({}^{f_k} r_{j_{(i+n)}}^s + {}^{f_k} r_{j_{(i+n)}}^d) {}^{f_k} q_{j_{(i+n)}} - {}^{p_k} S_{l_i}^d. \quad (2.63)$$

## 2.4 Adaptive synergies

Dallo studio del sistema di attuazione ricaviamo una prima importante relazione tra lo spostamento del tendine e le variabili di giunto, ovvero

$$z = -Rq, \quad (2.64)$$

dove  $z$  rappresenta lo spostamento del tendine, mentre il vettore  $R$  contiene i raggi delle pulegge su cui scorre il tendine

$$R = \left[ (f_k r_{j_1}^s + f_k r_{j_1}^d) \dots (f_k r_{j_{(i+5)}}^s + f_k r_{j_{(i+5)}}^d) \right]. \quad (2.65)$$

Differenziando l'Eq.(2.64) diventa

$$\partial z = -R \partial q \quad (2.66)$$

Sfruttando ancora una volta la dualità cineto-statica e sapendo che il lavoro compiuto dai giunti è pari a

$$W_j = \tau^T \partial q \quad (2.67)$$

mentre il lavoro compiuto dall'end-effector è

$$W_{ee} = \epsilon^T \partial z, \quad (2.68)$$

dove  $\epsilon$  è la coppia fatta dal motore utilizzato per far muovere il tendine, dall'uguaglianza si otterrà

$$\tau^T \partial q = \epsilon^T \partial z. \quad (2.69)$$

Sostituendo quanto ricavato nell'Eq.(2.66) si ottiene

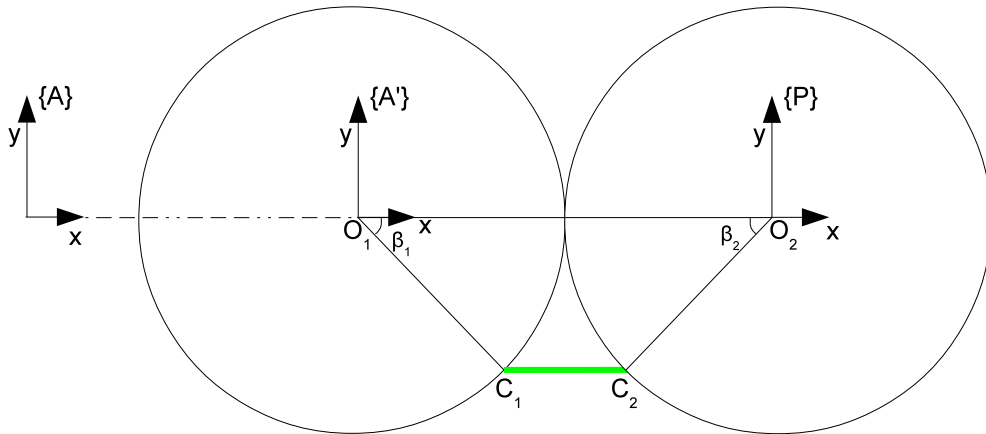
$$\partial \tau = -R^T \partial \epsilon. \quad (2.70)$$

Ma bisogna tener conto anche dell'elasticità presente ai giunti.

Calcoliamo il contributo fornito dall'elemento elastico come

$$K_q = k \Delta l, \quad (2.71)$$

con  $\Delta l = l - l_0$ , ovvero la differenza tra la lunghezza dell'elastico quando il giunto è ruotato di un certo angolo ( $l$ ) e la sua lunghezza a riposo ( $l_0$ ). I due casi sono mostrati in Fig.2.12 e Fig.2.13



**Figura 2.12:** Sistema con elastico a riposo

La lunghezza  $l_0$  può essere calcolata come la distanza tra i punti  $C_1$  e  $C_2$ .

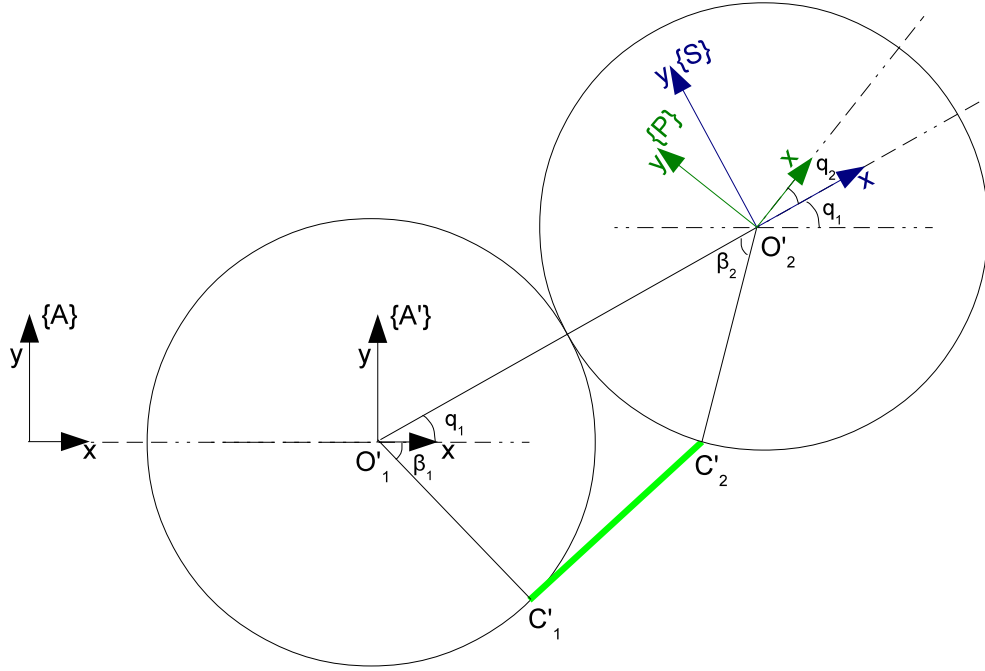
Infatti le coordinate di  $O_1$ ,  $O_2$  e  $C_1$  sono note; posso dunque ricavare le coordinate di  $C_2$  come

$$C_{2x} = \overline{C_2 O_2} \cos(\beta_2) \quad (2.72)$$

$$C_{2y} = \overline{C_2 O_2} \sin(\beta_2). \quad (2.73)$$

Da qui ricaviamo la lunghezza  $l_0$  come

$$l_0 = \sqrt{(C_{1x} - C_{2x})^2 + (C_{1y} - C_{2y})^2} \quad (2.74)$$



**Figura 2.13:** Sistema con elastico ruotato di un certo angolo

Nel caso in cui il giunto sia ruotato di un certo angolo, come mostrato in Fig.2.13, é noto che

$$\overline{O'_1 O'_2} = \overline{O_1 O_2} \quad (2.75)$$

$$\overline{O'_1 C'_1} = \overline{O_1 C_1} \quad (2.76)$$

$$\overline{O'_2 C'_2} = \overline{O_2 C_2}. \quad (2.77)$$

Per ricavare il vettore  $P_{\{C'_2\}}^{\{A\}}$  contenente le coordinate di  $C'_2$  rispetto al sistema di riferimento  $\{A\}$  dobbiamo effettuare la seguente trasformazione

$$P_{\{C'_2\}}^{\{A\}} = T_{\{S\}}^{\{A\}} T_{\{P\}}^{\{S\}} P_{\{C'_2\}}^{\{P\}} = \begin{bmatrix} R_z^{\{S\}}(q_1) & \begin{matrix} O'_{2x}^{\{S\}} \\ O'_{2y}^{\{S\}} \\ 0 \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_z^{\{P\}}(q_2) & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C'_{2x}^{\{P\}} \\ C'_{2y}^{\{P\}} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.78)$$

I valori delle coordinate di  $O'_2$  calcolate nel sistema di riferimento  $\{S\}$  sono pari a

$$O'_{2x}^{\{S\}} = \overline{O'_1 O'_2} \cos(q_1) \quad (2.79)$$

$$O'_{2y}^{\{S\}} = \overline{O'_1 O'_2} \sin(q_1). \quad (2.80)$$

I valori delle coordinate di  $C'_2$  calcolate nel sistema di riferimento  $\{P\}$  sono pari a

$$C'_{2x}^{\{P\}} = \overline{C'_2 O'_2} \cos(\beta_2 - q_2) \quad (2.81)$$

$$C'_{2y}^{\{P\}} = \overline{C'_2 O'_2} \sin(\beta_2 - q_2). \quad (2.82)$$

Noti i valori di  $C'_{2x}^{\{A\}}$  e  $C'_{2y}^{\{A\}}$ , è semplice ricavare il valore della lunghezza  $l$  come

$$l = \sqrt{(C'_{1x} - C'_{2x}^{\{A\}})^2 + (C'_{1y} - C'_{2y}^{\{A\}})^2} \quad (2.83)$$

Con il termine aggiuntivo dovuto all'elasticità, l'Eq.(2.70), diventa

$$\partial\tau + K_q \partial q = -R^T \partial\epsilon \quad (2.84)$$

Dunque le Equazioni (2.12),(2.18),(2.66) e (2.84) formano un sistema

$$\begin{cases} \partial C - J \partial q = 0 \\ \partial\tau - Q \partial q - J^T \partial f = 0 \\ \partial z + R \partial q = 0 \\ \partial\tau + K_q \partial q + R^T \partial\epsilon = 0 \end{cases}$$

che può essere riscritto anche in forma matriciale

$$\begin{bmatrix} I_{\#c} & -J & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Q & I_{\#r} & -J^T & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 & I_{\#z} & 0 \\ 0 & K_q & I_{\#r} & 0 & 0 & R^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial C \\ \partial q \\ \partial\tau \\ \partial f_c \\ \partial z \\ \partial\epsilon \end{bmatrix} = 0. \quad (2.85)$$

Il sistema (2.85) si trova nella forma  $A \partial y = 0$ . Indicando con  $r_a$  la dimensione delle righe e con  $c_a$  la dimensione delle colonne, troviamo la loro differenza

$$c_a = 2\#f_c + 2\#q + 2\#z \quad (2.86)$$

$$r_a = \#f_c + 2\#q + \#z \quad (2.87)$$

$$c_a - r_a = \#f_c + \#z \quad (2.88)$$

Posso quindi parametrizzare il sistema attraverso un vettore contenente le variabili di dimensione  $(\#f_c + \#z)$ . Ottendendo la matrice A in forma numerica riesco a calcolare  $\Gamma$ , ovvero una generica base dello spazio nullo.

Da qui è possibile ricavare il vettore  $x$ , responsabile della combinazione delle colonne di  $\Gamma$  come funzione delle variabili indipendenti

$$x = \begin{bmatrix} \Gamma_{f_c} \\ \Gamma_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \partial f_c \\ \partial z \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

da cui

$$\partial y = \Gamma \begin{bmatrix} \Gamma_{f_c} \\ \Gamma_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \partial f_c \\ \partial z \end{bmatrix} \quad (2.90)$$

## 2.5 Soft synergies

Introducendo il concetto di Soft synergies dobbiamo tener conto di un'importante relazione tra le  $\dot{q}$  di ciascun giunto rotoidale e le  $\sigma$ , ovvero le  $\dot{q}$  ridotte date dalla configurazione sinergica.

$$\dot{q} = S\sigma \quad (2.91)$$

Per un  $k$ -esimo dito costituito da 6 giunti rotoidali la matrice  $S$  sarà così fatta

$$S = \begin{bmatrix} \frac{f_k R_{j_{i+1}}}{f_k R_{j_i}} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f_k R_{j_{i+3}}}{f_k R_{j_{i+2}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f_k R_{j_{i+5}}}{f_k R_{j_{i+4}}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.92)$$

dove  $f_k R_{j_i}$  indica il raggio dell' $i$ -esimo giunto.

Differenziando l'Eq.(2.91) otteniamo

$$\partial q = S\partial\sigma \quad (2.93)$$

Sfruttando nuovamente la dualità cineto-statica, imponiamo l'uguaglianza tra il lavoro compiuto ai singoli giunti

$$W_j = \tau^T \partial q \quad (2.94)$$

e il lavoro compiuto dai giunti ridotti

$$W_{gr} = \eta^T \partial\sigma, \quad (2.95)$$

dove con  $\eta$  viene indicato il vettore delle coppie ai giunti ridotti.

Dunque

$$\tau^T \partial q = \eta^T \partial\sigma, \quad (2.96)$$

in cui, sostituendo l'Eq.(2.93) si ricava

$$\partial\eta = S^T \partial\tau. \quad (2.97)$$

Costruiamo così il sistema tra l'Eq.(2.93) e l'Eq.(2.97)

$$\begin{cases} \partial q - S\partial\sigma = 0 \\ \partial\eta - S^T \partial\tau = 0 \end{cases}$$

# Capitolo 3

## Modello per la mano

In questo capitolo verrà analizzato il modello di equazioni per studiare l'intera mano. La struttura della mano è modulare, quindi il modello appena presentato per il dito è stato esteso a tutta la mano.

### 3.1 Equazioni per la mano

La stessa relazione ricavata in precedenza per un dito è ancora valida per tutta la mano

$$\partial C - J_h \partial q = 0 \quad (3.1)$$

Ciascun termine dovrà essere esteso all'intera mano. Vengono utilizzati gli Jacobiani calcolati per ciascuna delle 5 dita, composti a formare un'unica matrice in questo modo. Stiamo considerando una mano costituita da 5 dita, ciascuna delle quali è formata da 6 giunti rotoidali disposti in modo parallelo tra loro (ad eccezione del pollice, che ha 2 giunti in meno).

$$J_h = \begin{bmatrix} f_1 J & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 J & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3 J & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_4 J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_5 J \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La duale dell'Eq.(3.1) è

$$\partial \tau - Q_h \partial q - J_h^T \partial f = 0 \quad (3.3)$$

dove la matrice  $Q_h$  è sarà calcolata componendo le  $Q$  trovate per ciascun dito.

$$Q_h = \begin{bmatrix} f_1 Q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 Q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3 Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_4 Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_5 Q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Queste due equazioni formano un primo sistema

$$\begin{cases} \partial C - J_h \partial q = 0 \\ \partial \tau - Q_h \partial q - J_h^T \partial f = 0 \end{cases}$$



## 3.2 Adaptive synergies

La seguente equazione è quella che è stata ricavata nel capitolo precedente per un dito

$${}^{f_1}S_{j(i-n)}^d = - \sum_{n=0}^{i-1} ({}^{f_k}r_{j(i-n)}^s + {}^{f_k}r_{j(i-n)}^d) {}^{f_k}q_{j(i-n)} - {}^{f_5}S_{j(i-n)}^s \quad (3.5)$$

dunque l'equazione che ricavo per le adaptive synergies sono

$$\partial z = -R_h \partial q \quad (3.6)$$

dove  $R_h$  é la matrice contenente i raggi delle pulegge di tutta la mano

$$\begin{bmatrix} {}^{f_1}R & {}^{f_2}R & {}^{f_3}R & {}^{f_4}R & {}^{f_5}R \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

mentre la sua duale é nuovamente

$$\partial \tau = -R_h^T \partial \epsilon \quad (3.8)$$

che tenendo conto dell'elasticità ai giunti diventa

$$\partial \tau + K_{qh} \partial q = -R_h^T \partial \epsilon \quad (3.9)$$

la cui matrice di rigidezza  $K_q$  sarà data dalla composizione delle matrici di rigidezza ricavate per ciascun dito

$$K_{qh} = \begin{bmatrix} {}^{f_1}K_q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^{f_2}K_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^{f_3}K_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^{f_4}K_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & {}^{f_5}K_q \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Dunque, le equazioni ricavate formano un sistema

$$\begin{cases} \partial C - J_h \partial q = 0 \\ \partial \tau - Q_h \partial q - J_h^T \partial f = 0 \\ \partial z + R_h \partial q = 0 \\ \partial \tau + K_{qh} \partial q + R_h^T \partial \epsilon = 0 \end{cases}$$

che può essere riscritto anche in forma matriciale

$$\begin{bmatrix} I_{\#c} & -J_h & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Q_h & I_{\#\tau} & -J_h^T & 0 & 0 \\ 0 & R_h & 0 & 0 & I_{\#z} & 0 \\ 0 & K_{qh} & I_{\#\tau} & 0 & 0 & R_h^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial C \\ \partial q \\ \partial \tau \\ \partial f_c \\ \partial z \\ \partial \epsilon \end{bmatrix} = 0. \quad (3.11)$$

e come prima ci permette di ricavare il vettore contenente le variabili. Anche per l'intera mano il sistema si trova dunque nella forma  $A \partial y = 0$ . Indicando con  $r_a$  la dimensione delle righe e con  $c_a$  la dimensione delle colonne, troviamo la loro differenza

$$c_a = 2\#f_c + 2\#q + 2\#z \quad (3.12)$$

$$r_a = \#f_c + 2\#q + \#z \quad (3.13)$$

$$c_a - r_a = \#f_c + \#z \quad (3.14)$$

quindi posso parametrizzare il sistema attraverso un vettore contenente le variabili di dimensione  $(\#f_c + \#z)$ . Ottendendo la matrice  $A$  in forma numerica riesco a calcolare  $\Gamma$ , ovvero una generica base dello spazio nullo.

Da qui è possibile ricavare il vettore  $x$ , responsabile della combinazione delle colonne di  $\Gamma$  come funzione delle variabili indipendenti

$$x = \begin{bmatrix} \Gamma_{f_c} \\ \Gamma_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \partial f_c \\ \partial z \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

da cui

$$\partial y = \Gamma \begin{bmatrix} \Gamma_{f_c} \\ \Gamma_z \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \partial f_c \\ \partial z \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

### 3.3 Soft synergies

Anche la relazione introdotta precedentemente per le Soft synergies é ancora valida e va estesa all'intero sistema mano

$$\partial q = S_h \partial \sigma. \quad (3.17)$$

Considerando le  $S$  ricavate per ciascun giunto, la  $S_h$  per tutta la mano sarà data dalla loro composizione

$$S_h = \begin{bmatrix} f_1 S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_2 S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3 S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & f_4 S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & f_5 S \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

E ricaviamo allo stesso modo la sua duale

$$\partial \eta = S_h^T \partial \tau \quad (3.19)$$

# Capitolo 4

## ADAMS

Per la simulazione della Pisa-IIT Softhand si è scelto di utilizzare Adams, un programma della MSC Software. Adams è infatti uno strumento utile per lo studio della dinamica di parti in movimento e della distribuzione di carichi e forze in sistemi meccanici. In questo modo è possibile migliorare l'efficienza tecnica e ridurre i costi di sviluppo dei prodotti, permettendo già la validazione del progetto a livello di simulazione.



### 4.1 Mano su Adams

L'interfaccia grafica di Adams è abbastanza semplice; si è scelto di partire con la realizzazione di un nuovo modello e di importare i CAD della mano precedentemente realizzati in Pro/ENGINEER. Per la simulazione in Adams sono stati utilizzati dei CAD semplificati, in cui parti come pulegge, cuscinetti ecc non vengono considerati come singoli elementi. Questo perché geometrie complesse contribuiscono a rallentare molto la simulazione.

Ogni falange è stata importata come singola parte in formato **.prt** attraverso il comando **File Import**.

La prima interfaccia presente all'apertura di Adams/View é la seguente

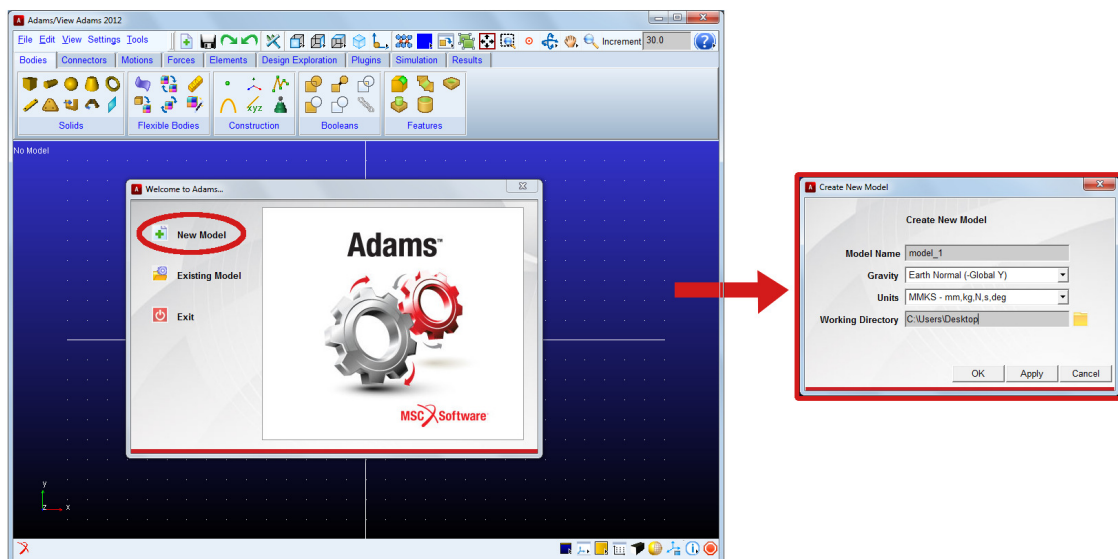
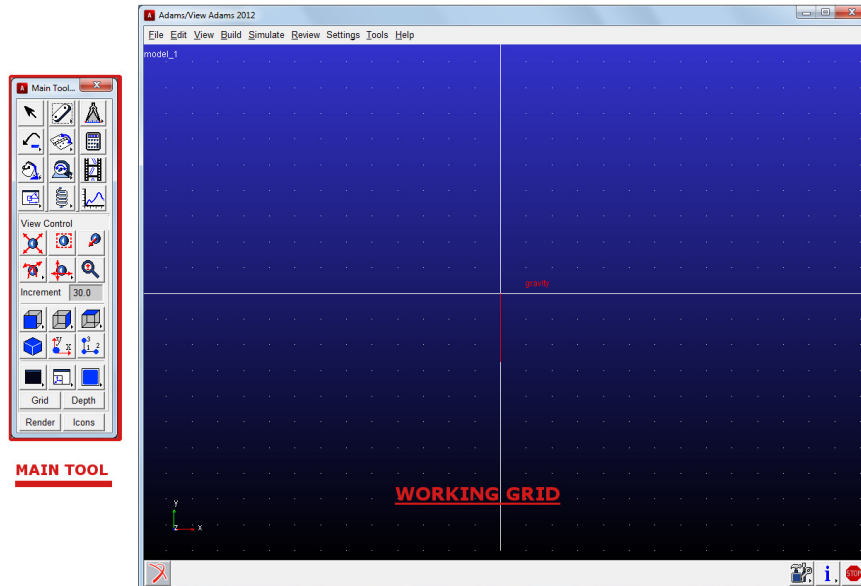


Figura 4.1: adamsview

Viene richiesto se si vuole procedere con la generazione di un nuovo modello o l'apertura di un modello già esistente e nel caso in cui si voglia procedere con la generazione di un nuovo modello è necessario selezionare le unità di misura che si preferisce utilizzare. Per la realizzazione della Pisa/IIT Softhand si è scelto di utilizzare mm, Kg, Newton e radianti.

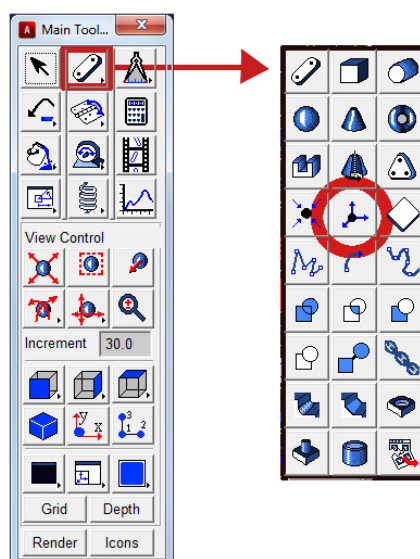
Quindi la gui di Adams/View apparirà come quella mostrata in Fig.4.2.



**Figura 4.2:** adamsgui

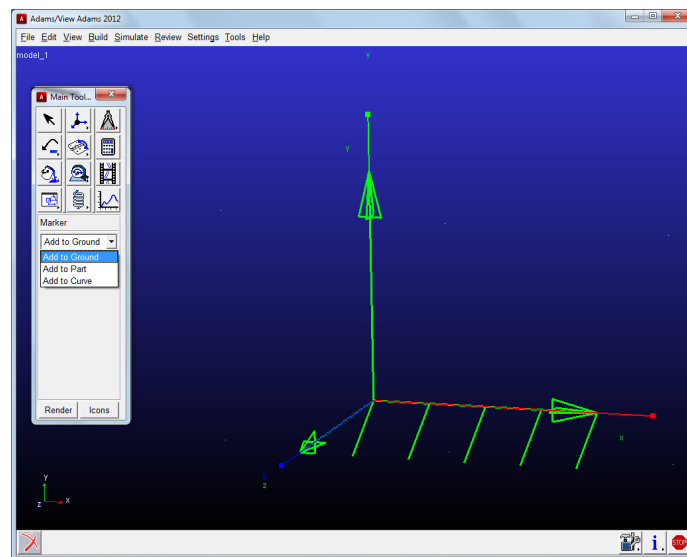
è presente il Main Tool e la Working Grid. Il Main Tool ci fornisce tutti gli elementi utili per la realizzazione del modello, come link, joint, marker, motion, ecc mentre la Working Grid rappresenta l'ambiente di lavoro, nella quale gli unici elementi definiti di default sono il ground e il sistema di riferimento globale ad esso attaccato. è possibile spostarsi nella working grid tramite i tasti T e R che consentono traslazione e rotazione del modello.

Sistemi di riferimento locali detti marker possono essere inseriti nel modello tramite il comando presente nel Main Tool (Main Tool tasto destro sul Geometry tool marker), mostrato in Fig.4.3.



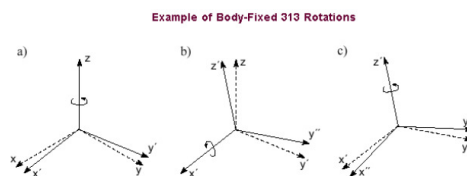
**Figura 4.3:** selmarker

Ciascun marker può essere costruito come elemento del ground, di una parte del modello e di una curva.



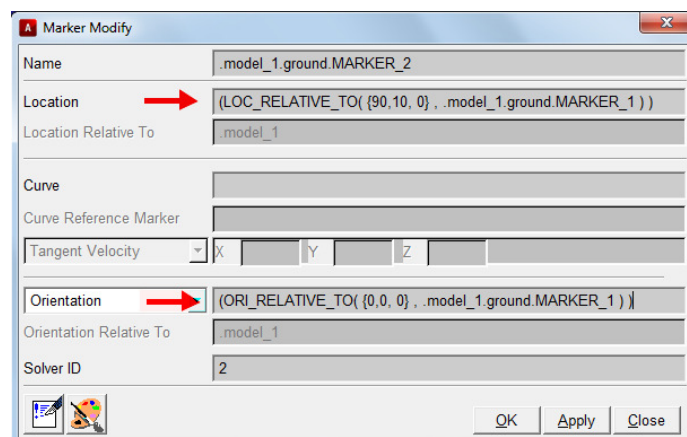
**Figura 4.4:** marker

ogni marker non é altro che un sistema di assi cartesiani per cui la posizione può essere definita inserendo i valori di X, Y e Z. Per quanto riguarda l'orientamento, é possibile scegliere tra un set di 24 sequenze di rotazioni. Il più utilizzato é il body 313, in cui il primo angolo effettua una rotazione del sistema di coordinate intorno all'asse Z, il secondo intorno all'asse X e il terzo ancora una volta intorno all'asse Z.



**Figura 4.5:** rotazioni

Possiamo definirne posizione e orientamento rispetto ad un altro marker tramite la finestra Marker Modify, che apparirà come quella mostrata in Fig.4.6.



**Figura 4.6:** markermodify

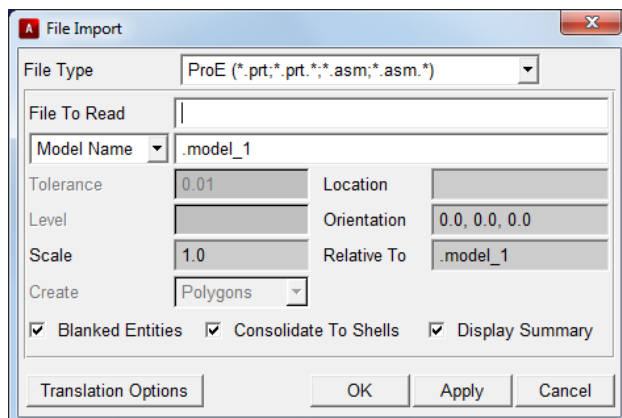
Come nell'esempio in Figura se si vuole definire la posizione del dove dentro parentesi graffe vengono inserite le distanze lungo X, Y e Z. Per quanto riguarda l'orientazione del Tra le parentesi graffe inseriamo i valori degli angoli per le rotazioni rispettivamente intorno a Z,X,Z.

In ciascuna parte che andremo a generare saranno presenti dei marker che rappresentano i sistemi di riferimento locali, la cui posizione e orientazione può essere inserita relativamente al sistema di riferimento globale o ad altri marker presenti in altre parti. Per comodità si è scelto di generare un marker attaccato al ground con posizione e orientazione nell'origine, a cui verranno successivamente riferiti gli altri elementi del modello.

Le informazioni di ciascun elemento inserito nel modello e le relazioni tra i varie elementi sono contenute nel database navigator (Tool Database Navigator ).

### 4.1.1 Import

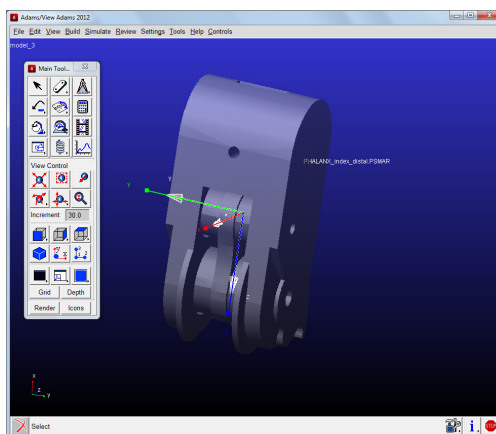
A questo punto é possibile procedere con l'inserimento delle parti. Adams/View possiede nel geometry tool alcune geometrie semplici di default, da utilizzare come parti. Nel caso della Pisa/IIT Softhand essendo in possesso dei CAD delle singole parti disegnate su ProEngineer, Adams/View ci consente di procedere direttamente con l'import dei file .prt (File Import).



**Figura 4.7:** import

Occorre selezionare il file da importare che può essere aggiunto al modello o ad una parte già presente nel modello.

La parte inserita é costituita da due elementi: SOLID che contiene la geometria della parte, ma che essendo proveniente da un file esterno non é modificabile, e un PSMAR, ovvero un marker che Adams/View assegna alla parte attraverso la quale é possibile definirne posizione e orientazione.



**Figura 4.8:** falange

In Fig.4.8 é mostrata l'interfaccia Adams/View dopo aver importato una falange distale. é evidenziato il marker PSMAR proprio della parte e attraverso la quale é possibile cambiare posizione e orientamento della falange.

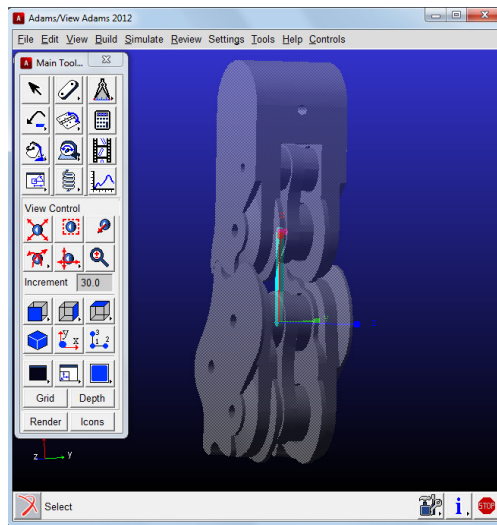
### 4.1.2 Rollarticular

Non appena completato l'import delle geometrie per intera mano dobbiamo procedere con l'inserimento dei rollarticular joints. Come già descritto durante lo studio della cinematica della mano, ciascun rollarticular joint può essere visto come una coppia di giunti rotoidali che ruotano l'uno sull'altro.

Immagine schema rollarticular

Per descrivere riprodurre questo tipo di giunto dunque si è scelto di inserire dei link virtuali tra un giunto rotoidale e l'altro.

Come link sono stati utilizzati quelli presenti nel Geometry Tool del Main Tool di Adams/View. Per inserire ogni link è necessario selezionare i due punti di inizio e fine, che nel nostro caso vanno a coincidere proprio con il centro del giunto rollarticolare per ogni falange.



**Figura 4.9:** link

A questo punto si procede con l'inserimento dei giunti rotoidali. Nel Main Tool di Adams/View è presente un Joint Tool, dalla quale è possibile scegliere diversi tipi di giunto. (Main Tool tasto destro sul joint tool).

Quindi per questa implementazione è stato scelto il Revolute Joint. Per ogni revolute joint occorre selezionare le due parti tra la quale avviene la rotazione e l'asse attorno alla quale deve essere compiuta.

Nel nostro caso, come evidenziato in Fig. 4.10, il giunto rotoidale evidenziato vincola la rotazione tra la falange distale e il link intorno all'asse z. Allo stesso modo sono stati posizionati tutti gli altri giunti, definendo così ciascun dito come un insieme di 6 giunti rotoidali (ad eccezione del pollice che ha una falange in meno).

A questo punto l'ultimo elemento mancante per definire il rollarticular joint consiste nell'ingranaggio. È possibile utilizzare la constraint di tipo Gear che si trova nel Joint Tool del Main Tool.

Tramite il Gear si crea una coppia di ingranaggi che mettono in relazione il movimento di tre parti e due giunti utilizzando un marker chiamato Common Velocity Marker, che determina il punto di contatto. Dunque dopo aver generato un marker in un punto che ipotizziamo virtualmente come il punto di contatto tra i due revolute joint (che nel caso in esame si trova proprio a metà del link), procediamo con l'inserimento del Gear. Una volta selezionato comparirà una schermata come quella mostrata in Fig.4.12; nel campo Joint Name vanno inseriti i nomi dei giunti tra i quali si vuole costruire l'ingranaggio, nel campo sottostante va scelto il marker a cui far riferimento.

Una volta completato il gear verrà visualizzato nel modello come in Fig.4.13



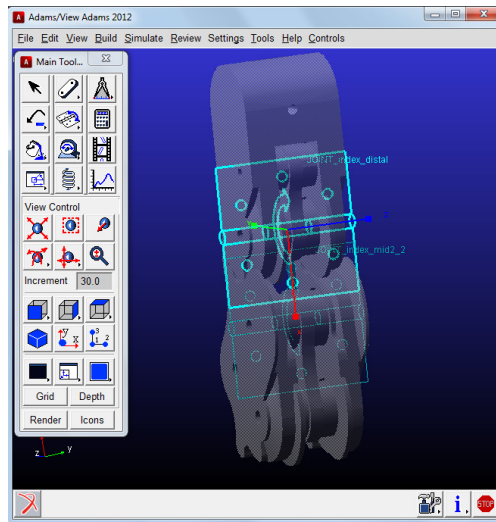


Figura 4.10: joint

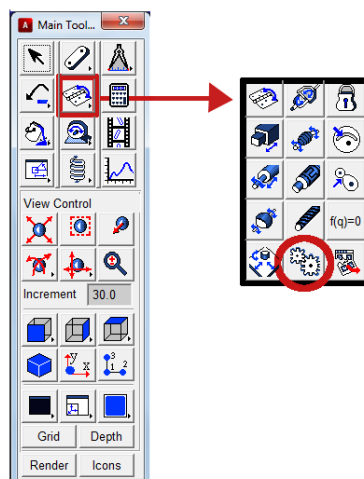


Figura 4.11: selgear

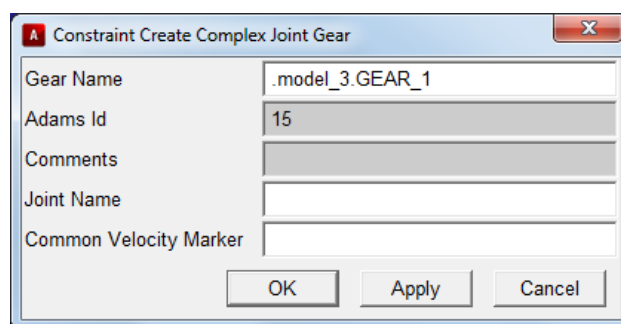
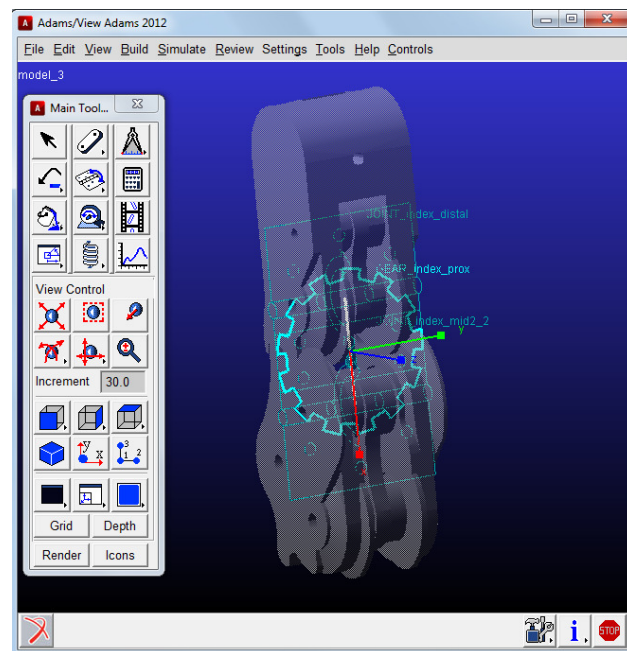
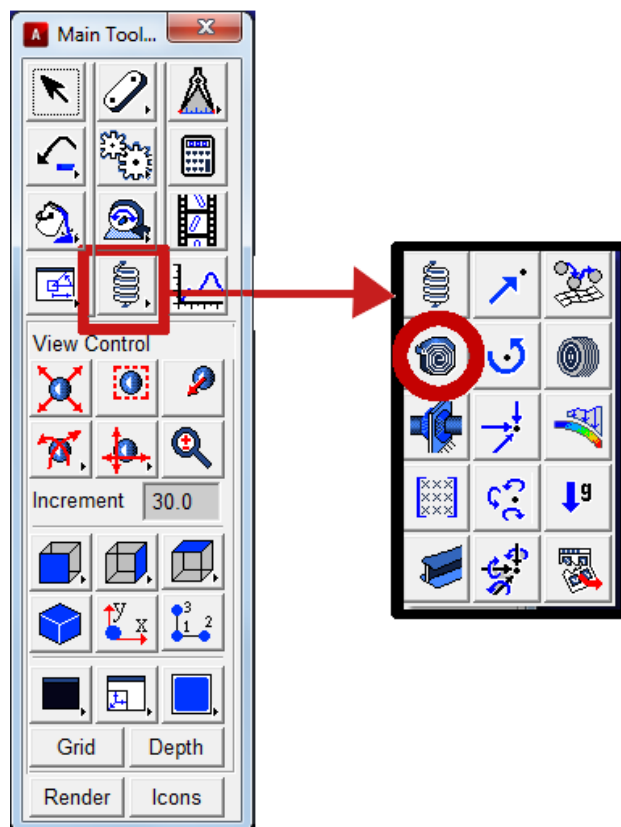


Figura 4.12: geardef



**Figura 4.13:** gear



**Figura 4.14:** selspring

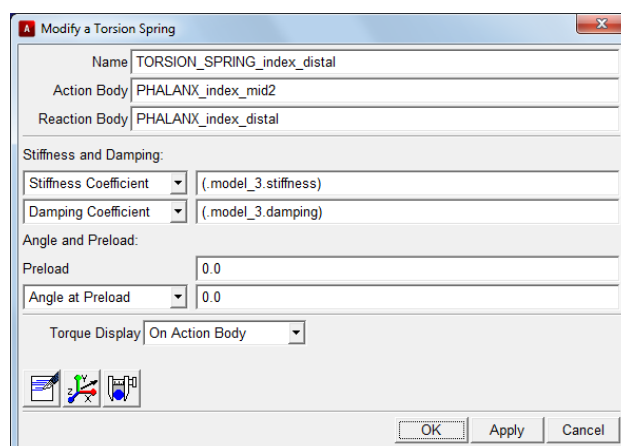
### 4.1.3 torsional springs

Per modellare su Adams gli elastici che legano insieme ciascuna coppia di falangi sono state utilizzate delle molle torsionali. Le molle torsionali su Adams/View vengono modellate come un sistema molla-smorzatore applicato tra due parti. Si trova all'interno del Connector Tool , Fig.4.14.

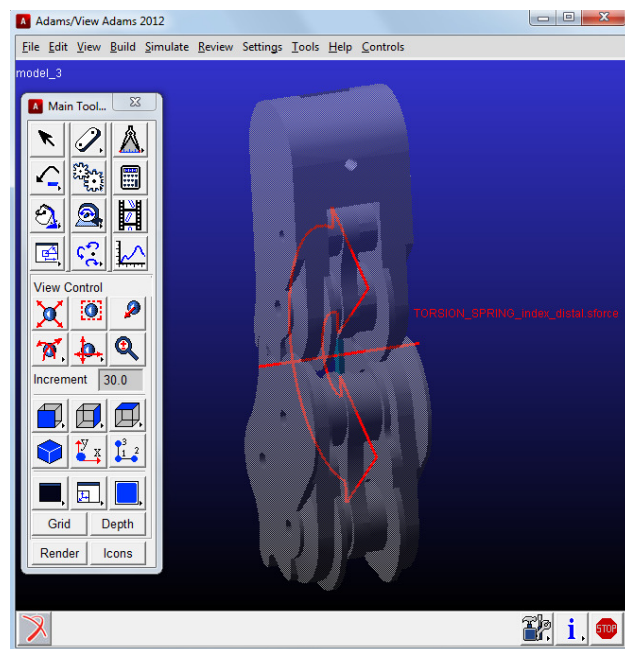
Selezionando questo tipo di connector appare l'interfaccia mostrata in Fig.4.15

Vanno selezionati le due parti tra le quali applicare la molla torsionale e i valori di stiffness e damping da imporre. Nel caso visualizzato si é scelto di generare due design variable (Built Design Variable New) tramite la quale imporre i due valori.

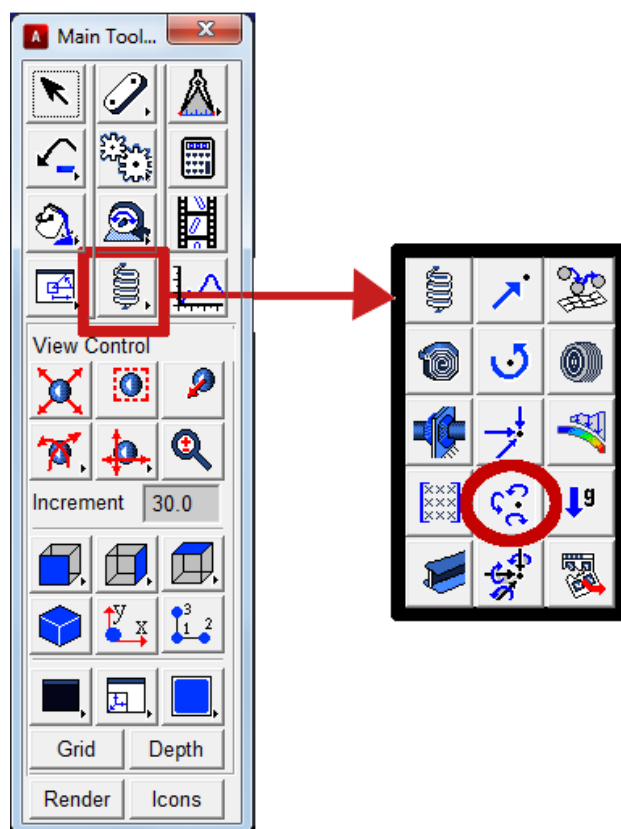
Nel modello verrà indicato come mostrato in Fig.4.16



**Figura 4.15:** springinit



**Figura 4.16:** spring



**Figura 4.17:** vtorquetool

#### 4.1.4 Torque

Utilizzando il Three-Component Torque vengono create forze rotazionali tra due parti del modello usando tre componenti ortogonali. Il Tool si trova all'interno del Connector Tool, Fig.4.20

Selezionando questo tipo di connector appare l'interfaccia mostrata in Fig.4.18

Vanno selezionate le due parti sulla quale vogliamo applicare questo tipo di connector e scegliere la torque da imporre lungo i 3 assi. Nel nostro caso l'unico asse di interesse é l'asse z, per il cui settaggio é stata scelta una variabile, detta motor torque che sarà imposta allo stesso modo per tutti i giunti e il cui valore é facilmente modificabile tramite il Table Editor (Tools Table Editor).

Nel modello verrà indicato come mostrato in Fig.4.19

Utilizzando il Three-Component Torque vengono create forze rotazionali tra due parti del modello usando tre componenti ortogonali. Il Tool si trova all'interno del Connector Tool, Fig.4.20

Selezionando questo tipo di connector appare l'interfaccia mostrata in Fig.4.18

Vanno selezionate le due parti sulla quale vogliamo applicare questo tipo di connector e scegliere la torque da imporre lungo i 3 assi. Nel nostro caso l'unico asse di interesse é l'asse z, per il cui settaggio é stata scelta una variabile, detta motor torque che sarà imposta allo stesso modo per tutti i giunti e il cui valore é facilmente modificabile tramite il Table Editor (Tools Table Editor).

Nel modello verrà indicato come mostrato in Fig.4.19

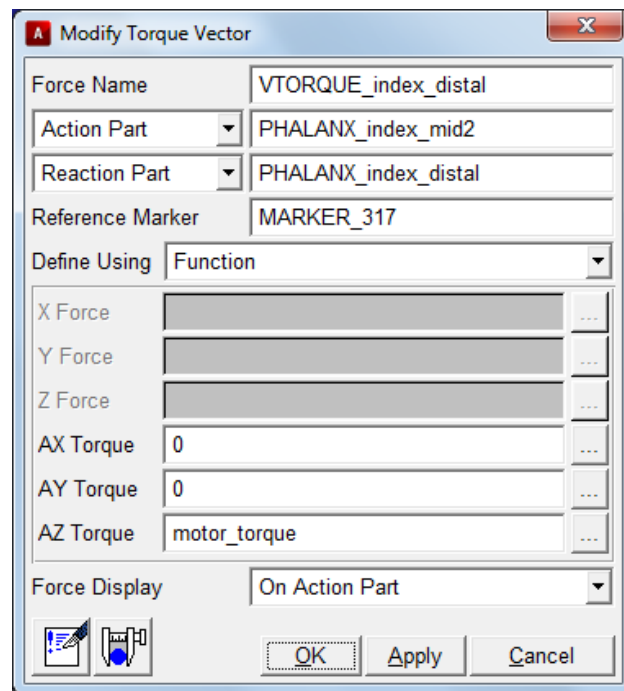


Figura 4.18: vtorque

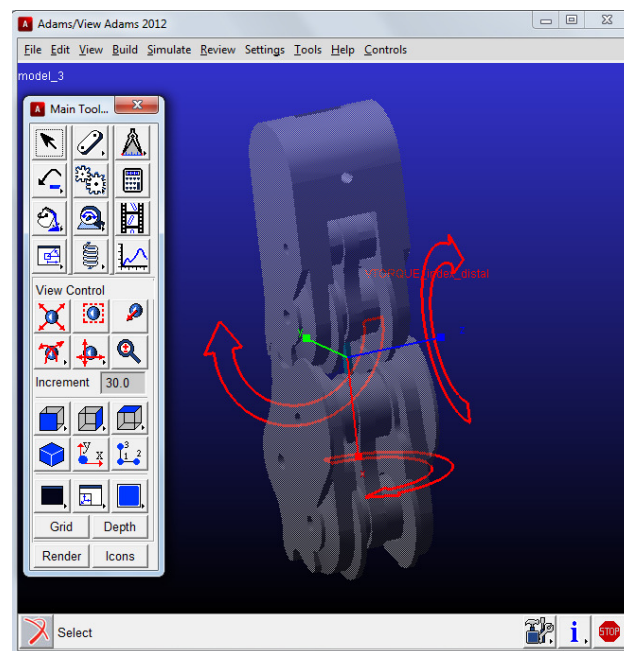
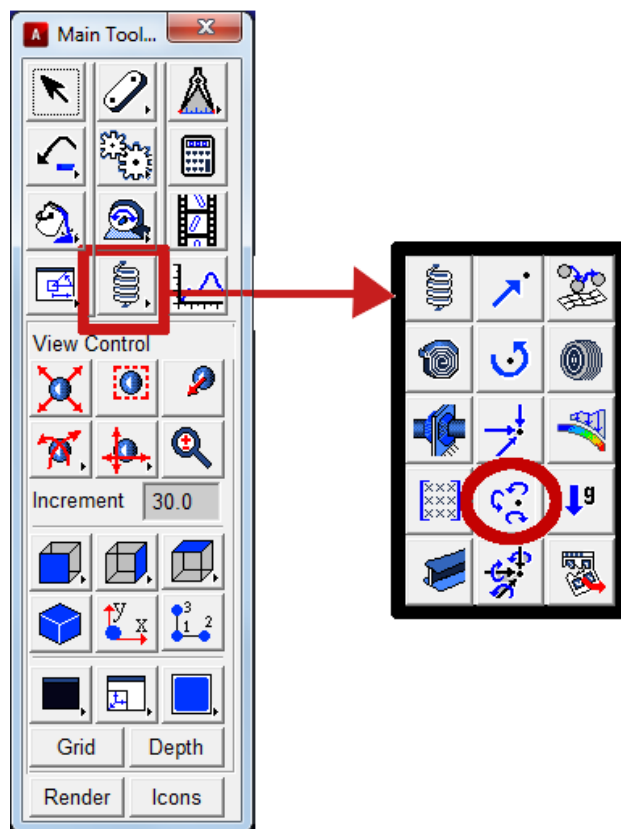
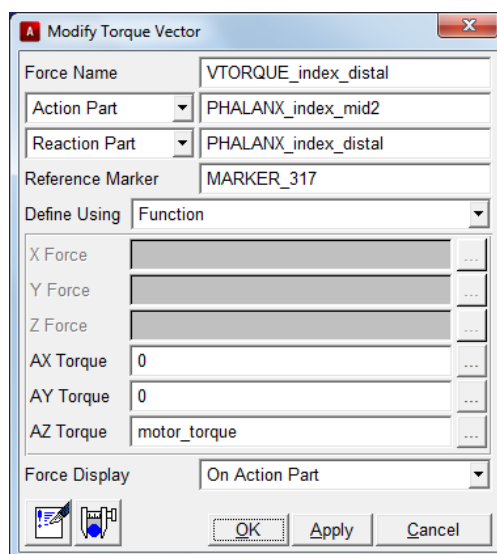


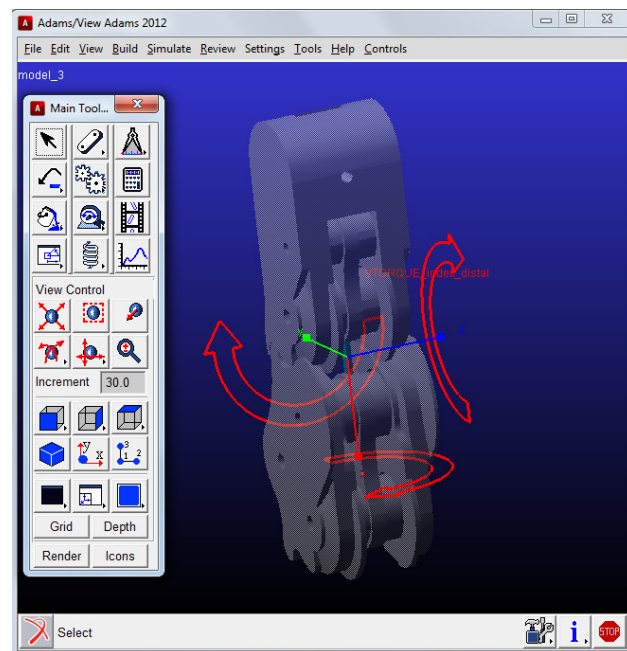
Figura 4.19: vtorque



**Figura 4.20:** vtorquetool

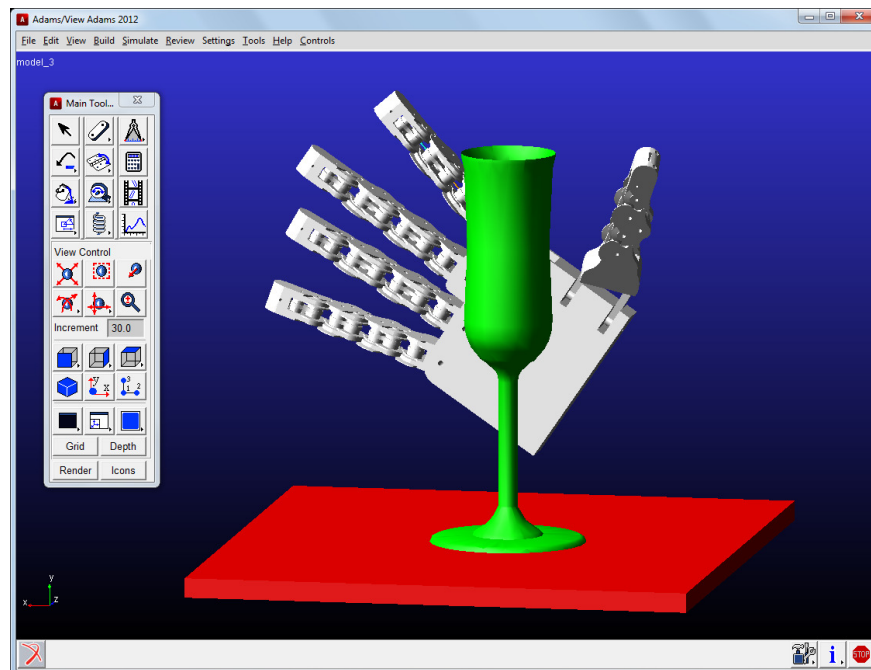


**Figura 4.21:** vtorque



**Figura 4.22:** vtorque





**Figura 4.23:** obj

Materiale	e
rubbers	1.1
soft metals (aluminium)	1.5
hard metals (steel)	2.2

**Tabella 4.1**

#### 4.1.5 oggetto

a questo punto abbiamo completato la cinematica della mano su Adams e possiamo procedere con l'inserimento di un oggetto sulla quale compiere la presa. é possibile inserire l'oggetto tramite la sequenza File Import e selezionando un File type di tipo Shell (\*.shl). L'oggetto importato su Adams viene utilizzato come una parte, quindi possiamo modificare posizione e orientamento come visto precedentemente. Si é scelto di definire posizione e orientamento dell'oggetto come 0,0,0 rispetto al marker di riferimento che abbiamo generato (MARKER PARAM). Infine si é creato un piano vincolato al ground sulla quale poggiare l'oggetto.

é necessario a questo punto definire un vincolo di contatto tra l'oggetto e il piano. Questo é possibile tramite il comando Contact che si trova nel menú Connector, che genera una forza di contatto tra due parti.

caso utilizzeremo il tipo Solid to Solid) inserire le due parti tra la quale definire il contatto. ct (ovvero scegliere la forza normale basandosi sull'impatto) e vanno dunque definite anche stiffness, Force Exponent, Damping e Penetration Depth. Infatti Adams modella la forza normale come un sistema molla-smorzatore non lineare.

La Stiffness rappresenta la rigidezza del materiale e il damping deve essere circa l'1 per diversi valori e scegliere il migliore. Ad esempio nel nostro modello abbiamo scelto di utilizzare un valore di stiffness pari a 1.0

La stiffness (k) é costante. Bisogna cercare di avere sempre un valore

Il damping dipende da due variabili, la massima variabile di damping (cmax) e il penetration depth. Un alto valore di damping smorza i rimbalzi mentre per valori bassi é piú facile che si verifichino i rimbalzi. Anche in questo caso, il migliore valore di damping viene scelto sulla base di simulazioni successive. Il valore che abbiamo scelto é di 10 N s/mm.

**Create Contact**

Contact Name: .model\_3.CONTACT

Contact Type: Solid to Solid

I Solid(s):

J Solid(s):

☒ Force Display: Red

Normal Force: Impact

Stiffness: 1.0E+005

Force Exponent: 2.2

Damping: 10.0

Penetration Depth: 0.1

☐ Augmented Lagrangian

Friction Force: Coulomb

Coulomb Friction: On

Static Coefficient: 0.3

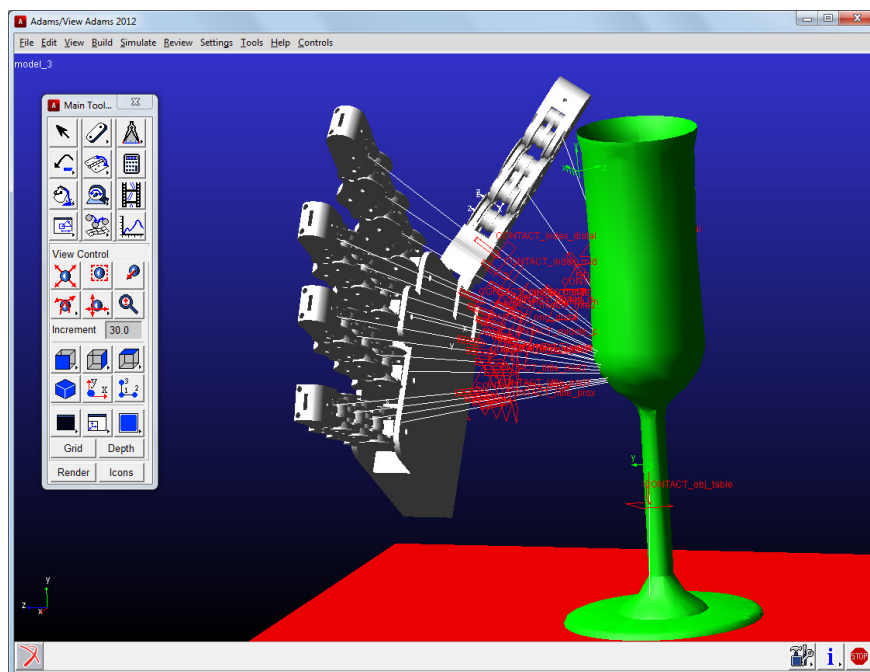
Dynamic Coefficient: 0.1

Stiction Transition Vel.: 100.0

Friction Transition Vel.: 1000.0

OK Apply Close

**Figura 4.24:** contact



**Figura 4.25:** contactview

Il penetration depth rappresenta la misura di come il coefficiente di damping passa da 0 a  $c_{max}$ , e dunque dovrebbe assumere un valore molto minore rispetto alla massima penetration depth che ci aspettiamo. Il valore scelto in questo caso è 0.01 mm.

Il calcolo della Normal force utilizzando l'impact function risulta essere efficiente, ma può richiedere tempi più lunghi nel momento in cui le geometrie sono complesse.

L'ultima parte dell'interfaccia riguarda l'attrito. Per prima cosa è necessario scegliere come modellare la forza d'attrito; le opzioni presenti nel menù a tendina sono Coulomb, None e User Defined. Nel nostro caso si è scelto il modello di Coulomb che utilizza quattro variabili: due coefficienti di attrito, statico e dinamico, e due velocità di transizione.

Quando la velocità di contatto è compresa tra 0 e la stiction transition velocity, il coefficiente d'attrito va da zero al valore del coefficiente di attrito statico. Il coefficiente di attrito statico dipende dal materiale dei due oggetti che vanno in contatto. Quando la velocità di contatto è compresa tra la stiction transition velocity e la friction transition velocity, il coefficiente d'attrito decresce dal valore del coefficiente di attrito statico a quello di attrito dinamico. I valori dei due coefficienti a seconda dei materiali sono riportati in tabella.

onosciuto come stiction. La  $V_s$  viene solitamente scelta pari a 100 mm/s mentre la  $V_d$  pari a 1000 mm/s.

Allo stesso modo sono stati definiti i contatti tra ogni falange, il palmo e l'oggetto.

Material 1	Material 2	$\mu_s$	$\mu_d$
Dry steel	Dry steel	0.70	0.57
Greasy steel	Dry steel	0.23	0.16
Greasy steel	Greasy steel	0.23	0.16
Dry aluminium	Dry steel	0.70	0.50
Dry aluminium	Greasy steel	0.23	0.16
Dry aluminium	Dry aluminium	0.70	0.50
Greasy aluminium	Dry steel	0.30	0.20
Greasy aluminium	Greasy steel	0.23	0.16
Greasy aluminium	Dry aluminium	0.30	0.20
Greasy aluminium	Greasy aluminium	0.30	0.20
Acrylic	Dry steel	0.20	0.15
Acrylic	Greasy steel	0.20	0.15
Acrylic	Dry aluminium	0.20	0.15
Acrylic	Greasy aluminium	0.20	0.15
Acrylic	Acrylic	0.20	0.15
Nylon	Dry aluminium	0.10	0.06
Nylon	Greasy aluminium	0.10	0.06
Nylon	Acrylic	0.10	0.06
Nylon	Nylon	0.10	0.06
Dry rubber	Dry steel	0.80	0.76
Dry rubber	Greasy steel	0.80	0.76
Dry rubber	Dry aluminium	0.80	0.76
Dry rubber	Greasy aluminium	0.80	0.76
Dry rubber	Acrylic	0.80	0.76
Dry rubber	Nylon	0.80	0.76
Dry rubber	Dry rubber	0.80	0.76
Greasy rubber	Dry steel	0.63	0.56
Greasy rubber	Greasy steel	0.63	0.56
Greasy rubber	Dry aluminium	0.63	0.56
Greasy rubber	Greasy aluminium	0.63	0.56
Greasy rubber	Acrylic	0.63	0.56
Greasy rubber	Nylon	0.63	0.56
Greasy rubber	Dry rubber	0.63	0.56
Greasy rubber	Greasy rubber	0.63	0.56

**Tabella 4.2**

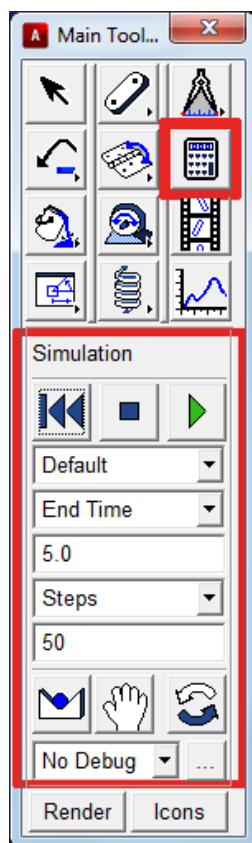


Figura 4.26: sim1

#### 4.1.6 Simulazione

Adesso che ogni elemento é stato definito e connesso é possibile procedere con la simulazione. Tramite il comando Interactive simulation controls si accede alla parte dedicata alla simulazione, tramite la quale é possibile visualizzare la chiusura della mano che abbiamo realizzato. Tramite i comandi play e stop riusciamo a gestire la simulazione. anche possibile settare la durata della simulazione definendo l'end time e il numero di steps.

é possibile anche generare uno script contenente i comandi della simulazione, tramite il tasto in fondo cerchiato di rosso in Fig.??

tramite questo comando si accede all'interfaccia visualizzata in Fig.??

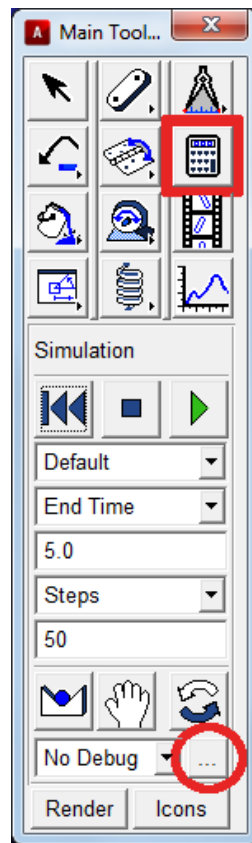
Tramite un click col tasto destro sullo spazio Simulation Script Name e procedendo con Simulation script Create appare la finestra di Fig.??

la sequenza di comandi che si vuole far eseguire durante la simulazione. Durante la nostra simulazione ad esempio vogliamo che lostrato in Fig.??, in cui con la prima riga facciamo andare la simulazione, una volta completata gli chiediamo di disaalizzare l'esito della presa.

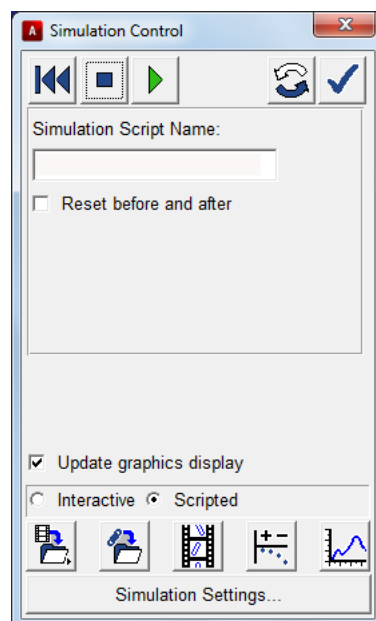
Adesso ci interessa variare la posizione della mano nello spazio intorno all'oggetto per verificare per quali posture della mano orientamento di questo marker definite rispetto alle mie nuove 4 variabili. Queste variabili possono essere modificare direttamente dalla Table Editor (Tools Table Editor).

Inoltre l'utilizzo di queste variabili ci permette di effettuare delle prove in serie fornendo le varie configurazioni della mano nello spazio direttamente tramite un unico file.

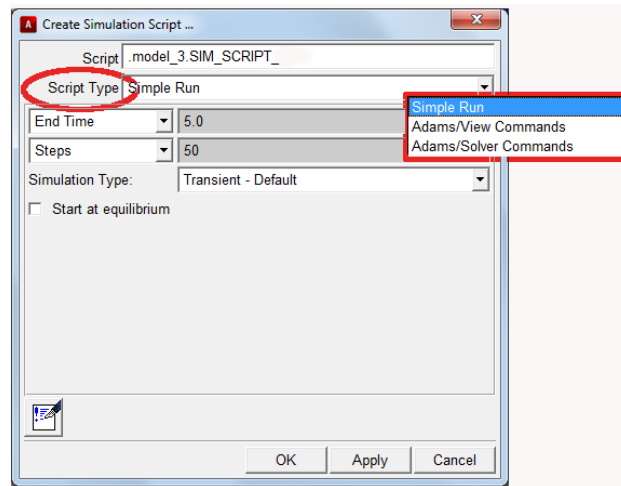
indice Adams Command File) tramite i comadi File Export.



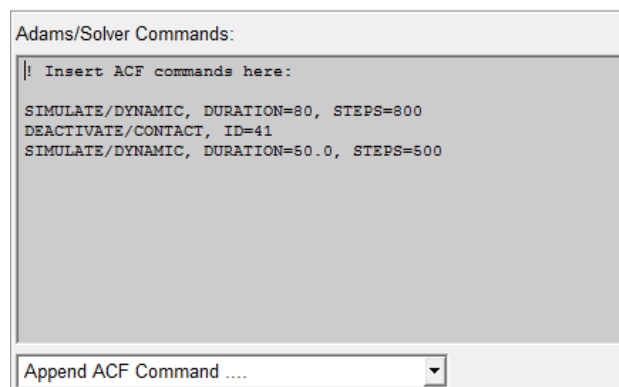
**Figura 4.27:** sim2



**Figura 4.28:** sim3



**Figura 4.29:** simscript



**Figura 4.30:** script

```

simulation set save_files = yes
output set output model = .model_3 reqsave = on
output set results model = .model_3 create = on
output set output model = .model_3 grsave = on

variable set variable =.model_3.rho real_value = 60
variable set variable=.model_3.azimut real_value = 0
variable set variable=.model_3.elevation real_value = 0
variable set variable=.model_3.alpha real_value = 0
file adams_data_set write &
model_name = .model_3 &
file_name = prova_r60a10az0e10 &
write_to_terminal = off

```

**Figura 4.31:** cmd

```

File/Model=prova_r60a10az0e10.adm
SIMULATE/DYNAMIC, DURATION=100, STEPS=800
save/system, file=prova_r60a10az0e10.sav
rel/system, file=prova_r60a10az0e10.sav, out=prova_r60a10az0e102
DEACTIVATE/CONTACT, ID=41
SIMULATE/DYNAMIC, DURATION=10.0, STEPS=500
save/system, file=prova_r60a10az0e102.sav

```

**Figura 4.32:** acf

#### 4.1.7 Adams-Matlab

Le simulazioni in serie possono essere lanciate tramite un unico file che contiene tutte le configurazioni della mano e mi restituisce l'esito della presa. Ho bisogno di 2 file che possono essere generati tramite Matlab.

tramite quattro cicli for innestati genera 170 possibili combinazioni di valori di rho, azimut, elevation e alpha. Tramite l'm.

La seconda parte del file Softhand.m invece genera il file configurazionibatch.acf contenente per ciascuna configurazione una sequenza del tipo

Il file configurazionibatch.acf prende ciascun file .adm generato ed effettua la simulazione. Al termine genera 4 file: .res, .req, .gra e .msg.



# Appendice A

## Tabelle valori $q$ ricavati con Matlab

# Appendice B

## Codice matlab

### B.1 *file.m*