



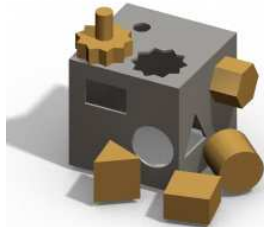
Istituto di Tecnologie Industriali e Automazione  
Consiglio Nazionale delle Ricerche



# **MM&A**

## ***Micro Manipulation and Assembly***

**D2.1**



### MICROMANIPOLATORE A 4-GDL

PROGETTO DI MASSIMA

<b>Documento interno</b>		MM&A-PRIN2009-0001	
<b>Progetto</b>	PRIN2009	<b>Coordinatore scientifico</b>	Prof. Giovanni Legnani
<b>Data</b>	20/07/2012	<b>N° pagine</b>	

6			
5			
4			
3			
2			
1	Prima emissione	UniBg	20/07/12
<b>Rev.</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Autore</b>	<b>Data</b>

## Indice

1	Introduzione .....	3
1.1	Specifiche principali di progetto.....	3
2	Struttura cinematica.....	4
3	Indici prestazionali e criteri di progetto .....	5
3.1	Spazio di lavoro.....	5
3.2	Numero di condizionamento.....	6
3.3	Indice di manipolabilità .....	7
3.4	Sensibilità .....	8
3.4.1	Stima della ripetibilità.....	9
3.4.2	Stima della risoluzione angolare.....	10
3.4.3	Stima dell'influenza della temperatura sul posizionamento.....	10
3.5	Analisi dinamica.....	11
4	Configurazione meccanica e ingombri .....	12
4.1	Configurazione meccanica.....	12
4.1.1	Attuatori .....	14
4.2	Ingombri .....	15

# 1 Introduzione

In questa seconda fase dell'attività di ricerca l'unità UNIBG ha sviluppato e messo a punto una serie di strumenti software per la sintesi cinematica e dinamica del micromanipolatore e per la selezione dei sistemi di azionamento più idonei ad essere integrati all'interno del sistema con particolare riguardo alla scelta delle trasmissioni. Il codice di simulazione sviluppato consente di monitorare vari indici prestazionali utili per la sintesi e l'ottimizzazione del sistema.

## 1.1 Specifiche principali di progetto

Le principali specifiche di progetto emerse allo stato attuale della ricerca possono essere così riassunte:

- Il micro manipolatore deve garantire 4 gradi di libertà; tre di traslazione (X, Y e Z) per posizionare l'end-effector nello spazio cartesiano ed uno rotazionale  $\theta$  per orientare la micro parte.
- lo spazio di lavoro del micromanipolatore è di tipo prismatico, la sua proiezione nel piano xy è un rettangolo di  $85 \times 35$  mm (vedi Figura 1), mentre la sua estensione lungo la direzione Z dovrà tenere conto degli ingombri della piattaforma di posizionamento realizzata dall'unità di ricerca UNIPM. Con riferimento alla soluzione preliminare di UNIPM (vedi Figura 2) la corsa lungo Z deve essere superiore a  $12.2$  mm per evitare interferenze con i link della piattaforma. Pertanto si può ipotizzare una corsa massima di 15 mm.
- la ripetibilità nel piano xy dovrà essere inferiore a  $10 \mu\text{m}$
- la risoluzione nel piano xy deve essere dell'ordine del micron ( $\leq 1 \mu\text{m}$ ).
- Il carico nominale del manipolatore varia da  $10g$  per movimenti ad elevata dinamica, fino a  $100g$  per posizionamenti lenti. (vedi documento MM&A-PRIN2009-0001).
- Il tempo di percorrenza del ciclo di riferimento dovrà essere di 1 secondo con carico nominale di  $10g$  (vedi documento-MM&A-PRIN2009-0001).

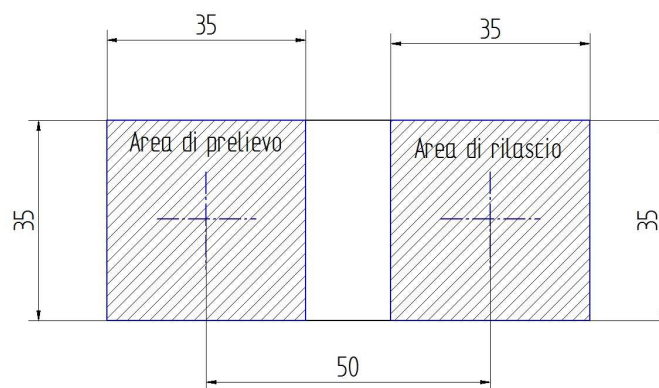


Figura 1 Area di lavoro nel piano xy. Sono evidenziate la zona di prelievo pezzi e la zona di rilascio ove verrà posta la piattaforma di orientamento.

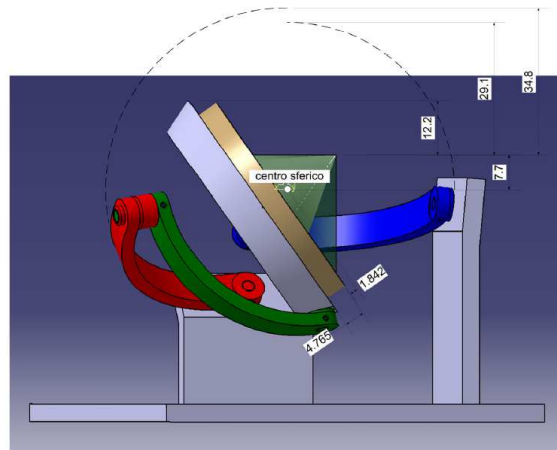


Figura 2 Ingombri piattaforma di orientamento UNIPM

## 2 Struttura cinematica

In base alle specifiche di progetto e dopo aver analizzato diversi micromanipolatori commerciali e sviluppati in ambito accademico si è optato per struttura cinematica ibrida. In particolare il movimento del piano  $xy$  è delegato ad una struttura cinematica a pentalatero (doppio SCARA), il movimento verticale (asse  $Z$ ) è ottenuto muovendo il manipolatore lungo la direzione verticale, mentre la rotazione (asse  $\theta$ ) viene realizzata con un attuatore direttamente posizionato sul giunto tra gli ultimi due link (giunto E in Figura 3).

Altri micromanipolatori ad architettura cinematica analoga, sviluppati in ambito industriale o accademico (ad esempio i robot ibridi Mitsubishi Melfa e il micromanipolatore IWF-Parvus), hanno uno spazio di lavoro simmetrico rispetto all'asse  $Y$ ; nel nostro caso valuteremo in fase di ottimizzazione la possibilità di realizzare un manipolatore con area di lavoro asimmetrica, aumentando in questo modo lo spazio raggiungibile a pari lunghezza dei link. Ovviamente questo comporta una maggior complessità a livello meccanico dovendo consentire un range di movimento maggiore dei link a terra.

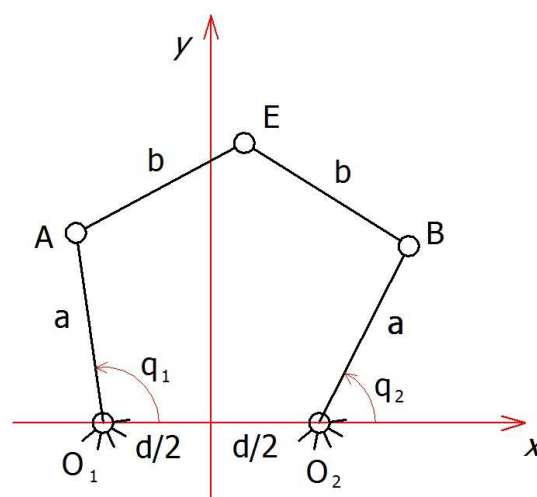


Figura 3 Schema cinematico della struttura parallela per i movimenti nel piano  $xy$

### 3 Indici prestazionali e criteri di progetto

Il pacchetto di programmi realizzato per la sintesi cinematica e dinamica consente di monitorare una serie di indici prestazionali essenziali al fine di ottimizzare il sistema. I principali indici presi in considerazione si basano sull'analisi della matrice jacobiana  $J$  o analogamente sulla matrice  $JJ^t$  del sistema.

#### 3.1 Spazio di lavoro

Un primo criterio per la sintesi dimensionale del manipolatore prende in considerazione lo spazio di lavoro richiesto dall'applicazione. Ovviamente lo spazio raggiungibile dal manipolatore deve contenere l'area rettangolare di lavoro. Nelle figure seguenti sono riportate le proiezioni in  $xy$  dello spazio raggiungibile dal manipolatore, la zona di lavoro è evidenziata in nero. In particolare si riportano i casi con spazio di lavoro simmetrico e con spazio di lavoro asimmetrico.

I risultati riportati si riferiscono alle seguenti dimensioni non ottimizzate dei link:

- distanza tra i giunti a terra →  $d=30mm$
- lunghezza delle spalle →  $a=50mm$
- lunghezza bracci →  $b=65mm$

Per la soluzione simmetrica i limiti di mobilità dei giunti a terra sono i seguenti:

$$\text{➤ } 25^\circ \leq q_1 \leq 235^\circ \rightarrow -55^\circ \leq q_2 \leq 155^\circ$$

Per la soluzione asimmetrica si ha:

$$\text{➤ } -180^\circ \leq q_1 \leq 180^\circ \rightarrow -150^\circ \leq q_2 \leq 150^\circ$$

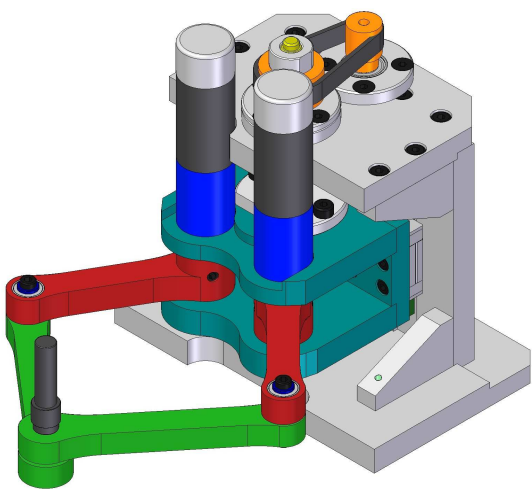


Figura 4 Prototipo virtuale del manipolatore con spazio di lavoro simmetrico

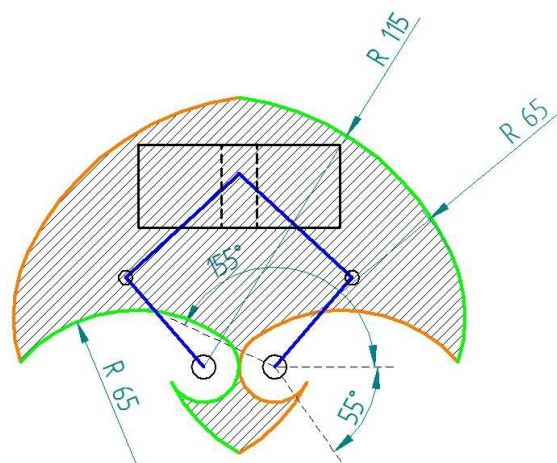


Figura 5 Spazio di lavoro nella configurazione simmetrica.

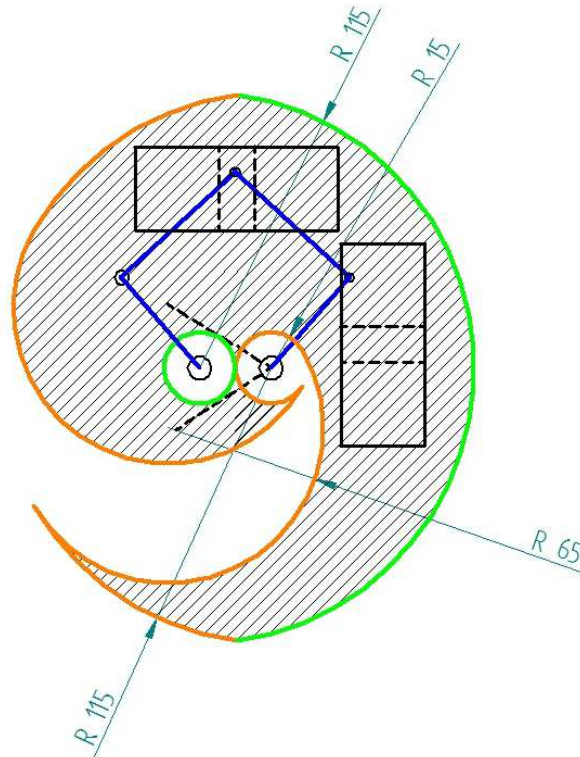


Figura 6 Spazio di lavoro raggiungibile nella configurazione asimmetrica. Il moto di  $q_2$  è limitato tra  $\pm 150^\circ$

### 3.2 Numero di condizionamento

Come indice prestazionale principale abbiamo assunto il numero di condizionamento  $\kappa$  definito come il rapporto tra il massimo e il minimo valore singolare della matrice Jacobiana:

$$\kappa = \sqrt{\text{cond}(J J^t)} = \text{cond}(J)$$

A titolo di esempio, nella Figura 7 e nella Figura 8 sono riportate le aree di lavoro raggiungibili con numero di condizionamento minore di 2, per la soluzione simmetrica e per quella asimmetrica.

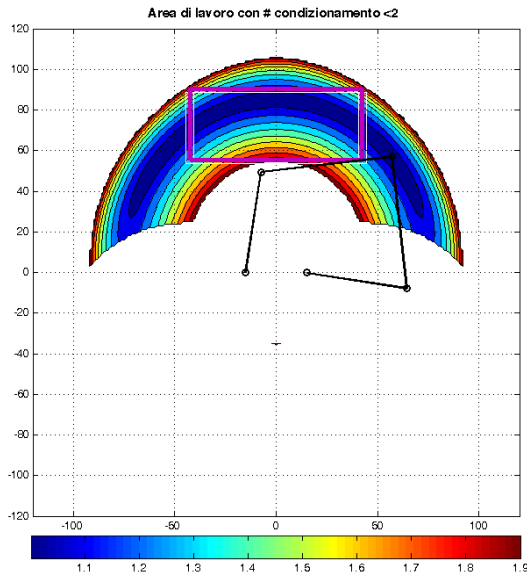


Figura 7 Area di lavoro con numero di condizionamento  $\kappa < 2$ . Soluzione simmetrica. Valore medio di  $\kappa$  nel rettangolo di lavoro (in viola):  $\kappa_m = 1.37$

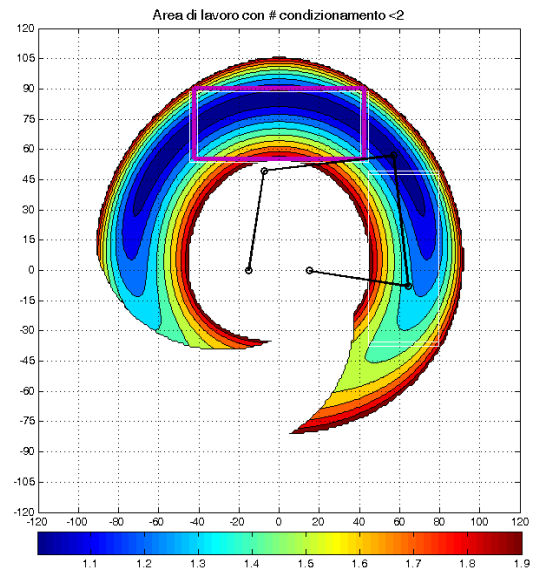


Figura 8 Area di lavoro con numero di condizionamento  $\kappa < 2$  per soluzione asimmetrica. Valore medio di  $\kappa$  nel rettangolo di lavoro (in viola):  $\kappa_m = 1.37$

### 3.3 Indice di manipolabilità

Un altro indice prestazionale preso in esame è l'indice di manipolabilità indicato con  $I_M$  e definito nel modo seguente:

$$I_M = \sigma_{\min} \quad \text{dove } \sigma_{\min} \text{ è il più piccolo valore singolare della matrice } J,$$

oppure in modo equivalente:

$$I_M = \sqrt{\lambda_{\min}} \quad \text{dove } \lambda_{\min} \text{ è il minimo autovalore della matrice } JJ^t$$

Nelle figure seguenti sono riportati gli indici di manipolabilità per la soluzione simmetrica e per quella asimmetrica, sempre all'interno dello spazio di lavoro con  $\kappa < 2$ .

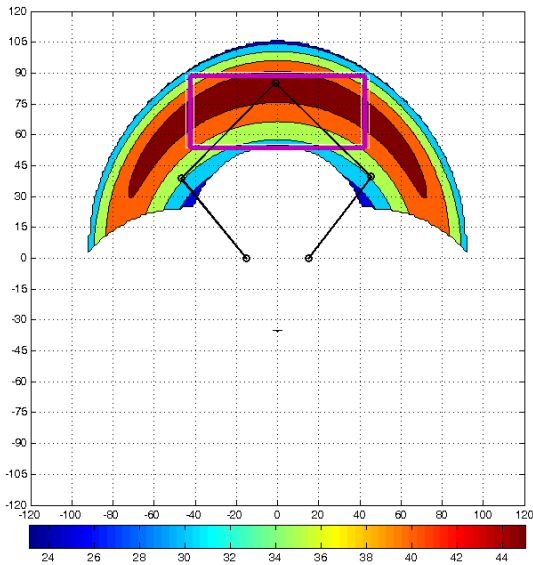


Figura 9 Indice di manipolabilità per la soluzione simmetrica. Lo spazio di lavoro è limitato da  $\kappa < 2$ . Valore medio di  $I_M$  nella zona di lavoro (in viola)  $I_M = 41.5 \text{ mm/rad}$

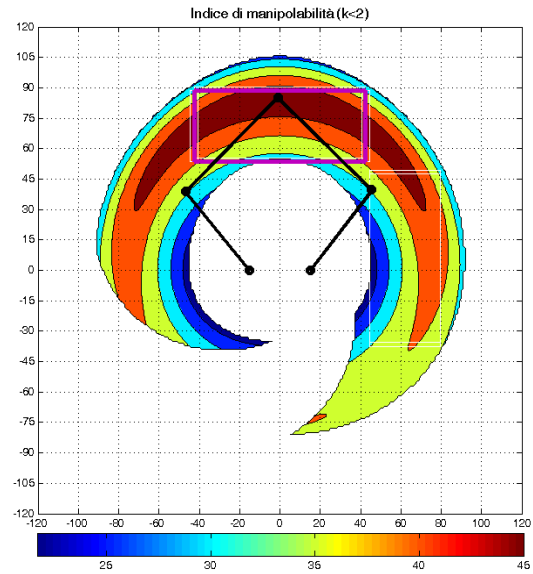


Figura 10 Indice di manipolabilità per la soluzione asimmetrica. Lo spazio di lavoro è limitato da  $\kappa < 2$ . Valore medio di  $I_M$  nella zona di lavoro (in viola)  $I_M = 41.5 \text{ mm/rad}$

### 3.4 Sensitività

Un'altra misura utile presa in considerazione è la sensibilità di posizionamento nell'area di lavoro, definita come l'incertezza della posa del robot causata dall'incertezze nelle rotazioni ai giunti. Questo indice viene calcolato in tutti i punti dello spazio di lavoro, mentre come indice globale si assume il suo valore medio nella rettangolo di lavoro.

La sensibilità in direzione X e Y è stata definita rispettivamente come sommatoria dei valori assoluti degli elementi della prima e della seconda riga dello jacobiano:

$$S_x = \sum_{i=1}^2 |j_{1,i}| \quad \text{e} \quad S_y = \sum_{i=1}^2 |j_{2,i}|$$

dove con  $|j_{k,i}|$  si è indicato il valore assoluto dell'elemento dello jacobiano.

Mentre la sensibilità complessiva nei punti del campo di lavoro viene definita come:

$$S_{xy} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$



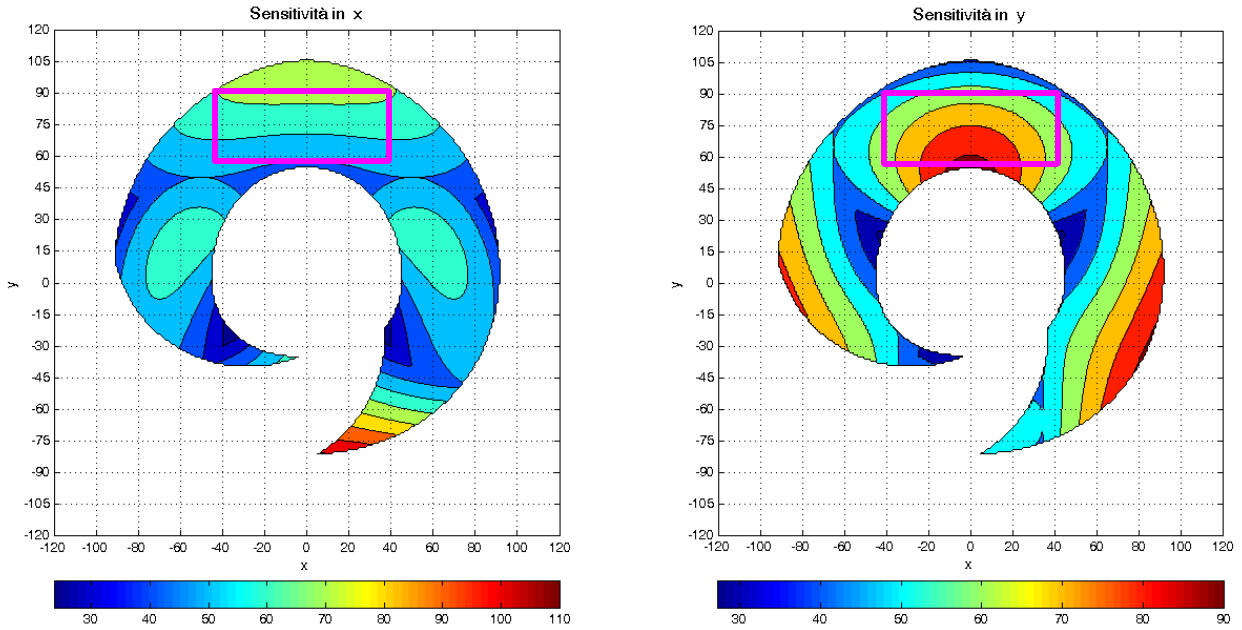


Figura 11 Andamento della sensitività nello spazio di lavoro limitato da  $k < 2$ . A sinistra i valori in X, mentre a destra quelli in direzione Y. Valori medi nella zona di lavoro (rettangolo viola):  $S_x=62\text{mm/rad}$ ,  $S_y=68\text{mm/rad}$

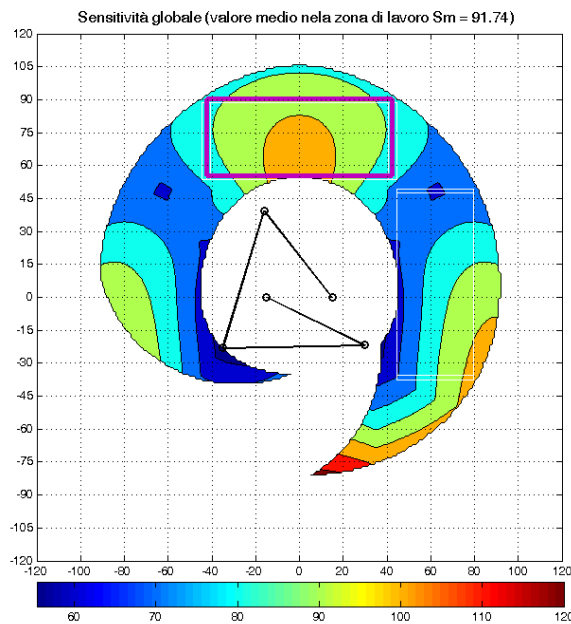


Figura 12 Sensività complessiva nello spazio di lavoro con  $k < 2$ . Valore medio di  $S_{xy}$  nel rettangolo di interesse,  $S_{xy}=91\text{ mm/rad}$

### 3.4.1 Stima della ripetibilità

Le informazioni date dalla misura di sensitività possono essere utili per stimare la ripetibilità del sistema dovuta ad esempio alle incertezze sul posizionamento introdotte dalle trasmissioni (giochi, fenomeni di isteresi, etc.).

Riferendoci al caso riportato nella Figura 12 si ha che la sensitività media nella zona rettangolare di lavoro vale all'incirca  $S_{xy} = 91 \text{ mm/rad}$ . Ipotizzando una ripetibilità della trasmissione  $R_T=10 \text{ arcsec}$  (ripetibilità nominale di un tipo di micro Harmonic-Drive commerciale) si ha:

$$R_T = \left( \frac{10}{3600} \right)^\circ \cong 4.84 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

A questo punto si può ricavare una stima dell'errore di posizionamento dovuto all'incertezze della trasmissione:

$$R_S = R_T S_{xy} \cong 4.4 \text{ } \mu\text{m}$$

### 3.4.2 Stima della risoluzione angolare

L'analisi di sensitività consente di poter stimare la risoluzione angolare dei sensori di posizione per poter ottenere la risoluzione di posizionamento attesa.

A titolo di esempio e riferendoci alla Figura 11 e si ha:

- Sensitività media in x:  $S_x \approx 62 \text{ mm/rad}$
- Sensitività media in Y:  $S_y \approx 68 \text{ mm/rad}$
- Risoluzione attesa  $r_{xy} = 1 \text{ } \mu\text{m}$

Si ottiene la seguente risoluzione angolare al giunto:

$$r_{\theta 1} = \frac{2\pi}{n_1} = \frac{r_{xy}}{S_x} \Rightarrow n_1 = 2\pi \frac{S_x}{r_{xy}} \cong 3.9 \cdot 10^5$$

$$r_{\theta 2} = \frac{2\pi}{n_2} = \frac{r_{xy}}{S_y} \Rightarrow n_2 = 2\pi \frac{S_y}{r_{xy}} \cong 4.3 \cdot 10^5$$

Ipotizzando un rapporto di riduzione  $i=160$  si ha una stima della risoluzione angolare necessaria all'asse del motore consentendo la scelta del sensore di posizione adeguato:

$$n_m \geq \frac{n_2}{i} \cong 2.7 \cdot 10^3$$

### 3.4.3 Stima dell'influenza della temperatura sul posizionamento

Per quanto riguarda l'influenza della temperatura sul posizionamento dell'end-effector viene monitorata la "sensitività dimensionale" definita nel modo seguente:

$$S_L = \frac{\partial X}{\partial L}$$

dove  $X = [x \ y]^t$  è il vettore delle coordinate dell'end-effector e il vettore  $L = [a \ b \ d]^t$  contiene le lunghezze dei link.

Ad esempio con il manipolatore in  $X_E=0$  e  $Y_E=73$  mm (vedi Figura 13) si ottiene la seguente matrice di sensitività:

$$S_L = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & \dots \\ -0.29 & 1.65 & \dots \end{bmatrix}$$

Ipotizzando come materiale dei link alluminio, l'allungamento al  $C^\circ$  diventa:

$$\Delta a = \lambda_{Al} a = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \approx 1.2 \mu m / C^\circ$$

$$\Delta b = \lambda_{Al} b = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot 65 \approx 1.56 \mu m / C^\circ$$

L'errore dovuto alla dilatazione dei link a e b diventa:

$$\Delta X = S_L \Delta L = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 2.23 \end{bmatrix} \mu m / C^\circ$$

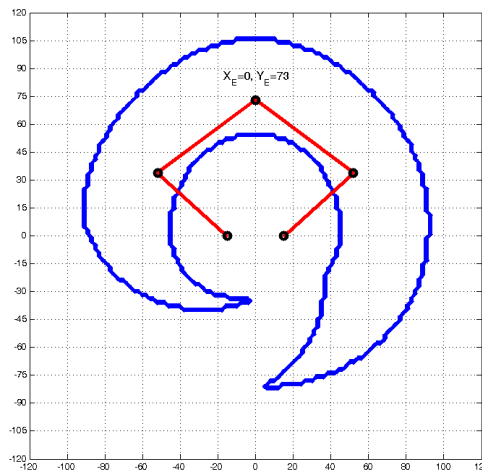


Figura 13 Configurazione del manipolatore con end-effector in  $X_E=0$ ,  $Y_E=73$ mm

### 3.5 Analisi dinamica

In via preliminare viene eseguita un'analisi dinamica per valutare le coppie ai giunti e all'albero di ingresso della trasmissione (una volta fissato il rapporto di trasmissione  $\tau$ ). La distribuzione d'inerzia dei link viene stimata assegnando la densità del materiale (in questo caso alluminio).

Nella figura sottostante è riportato un esempio delle coppie calcolate per una traiettoria lineare di lunghezza 50 mm percorsa in un tempo  $t_a=0.4$  s, con legge di moto ad accelerazione costante simmetrica. Il carico all'end-effector è di 50g (motore, pezzo, pinza).

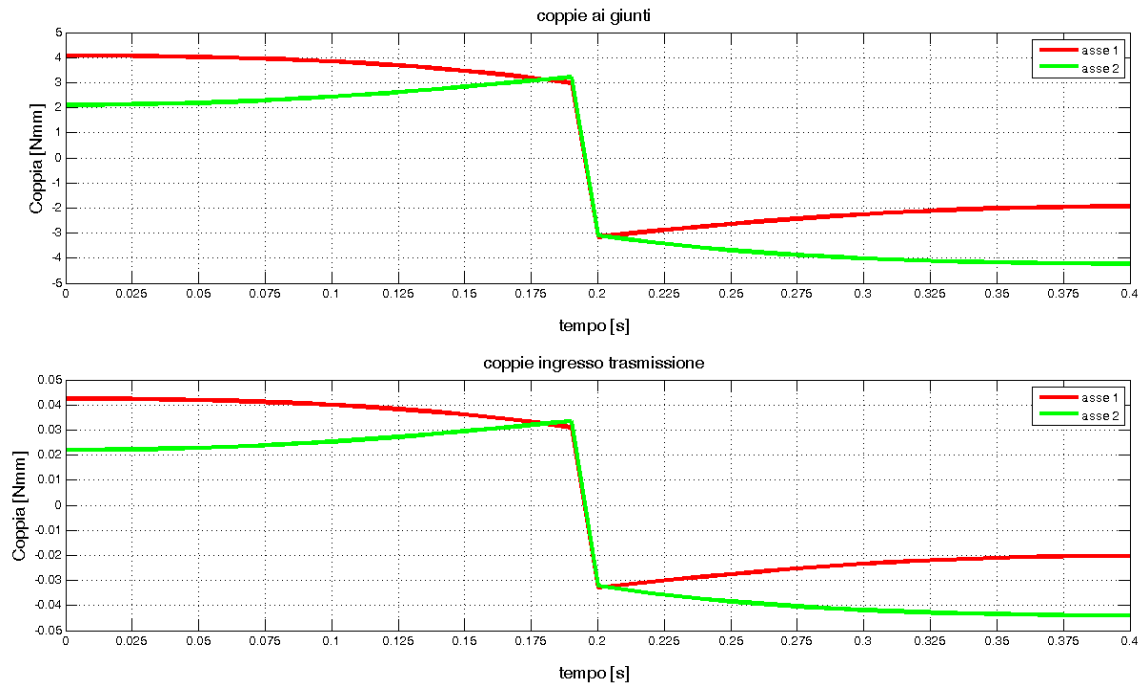


Figura 14 Andamento delle coppie ai giunti e all'ingresso della trasmissione. Trasmissione con  $\tau=1/160$  e  $\eta=0.6$ .

## 4 Configurazione meccanica e ingombri

### 4.1 Configurazione meccanica

Riferendoci alla Figura 15, i link 1 e 2 (evidenziati in rosso) sono vincolati al telaietto mobile e definiscono la posizione dell'end-effector nel piano x-y.

La posizione verticale della pinza è ottenuta muovendo lungo Z il telaietto mobile che è collegato al telaio fisso attraverso due guide lineari con carrelli a ricircolo di sfere. Il moto viene trasmesso al telaietto mobile attraverso una vite a ricircolo di sfere (Figura 16) attuata da una trasmissione a cinghia dentata (vedi Figura 17).

Da ultimo la rotazione della pinza viene realizzata attraverso un attuatore direttamente posizionato sull'ultimo giunto. L'attuatore è integrato con un micro riduttore Harmonic Drive (Figura 18).

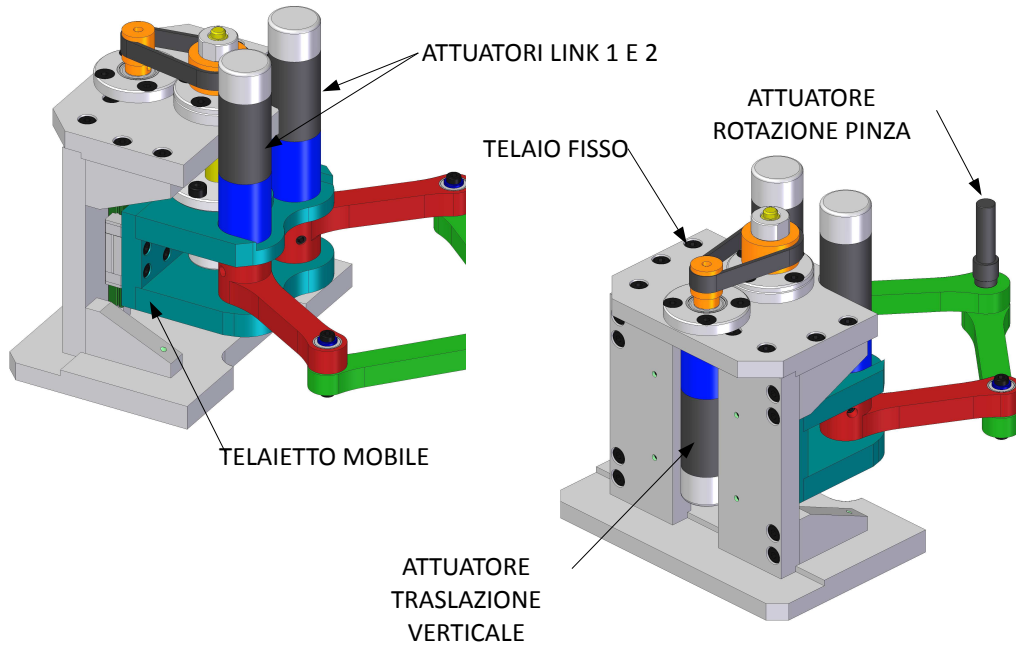


Figura 15 Viste e componenti principali del manipolatore

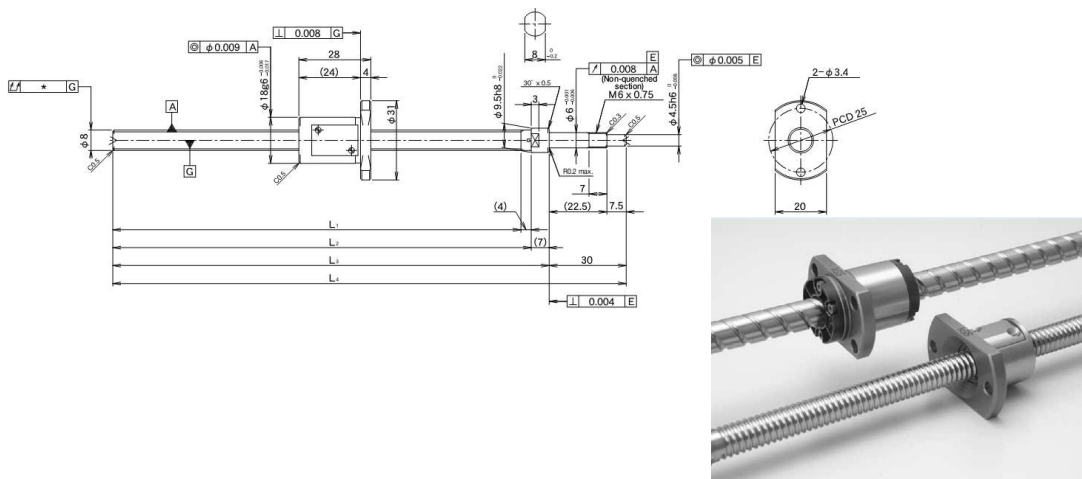


Figura 16 Micro vite a ricircolo di sfere.

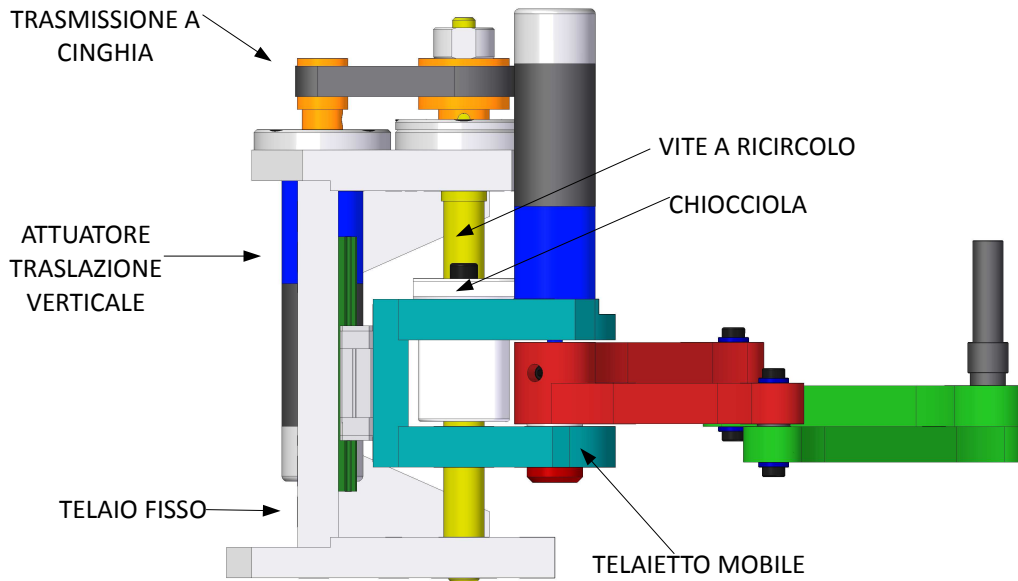


Figura 17 componenti del sistema per la traslazione verticale

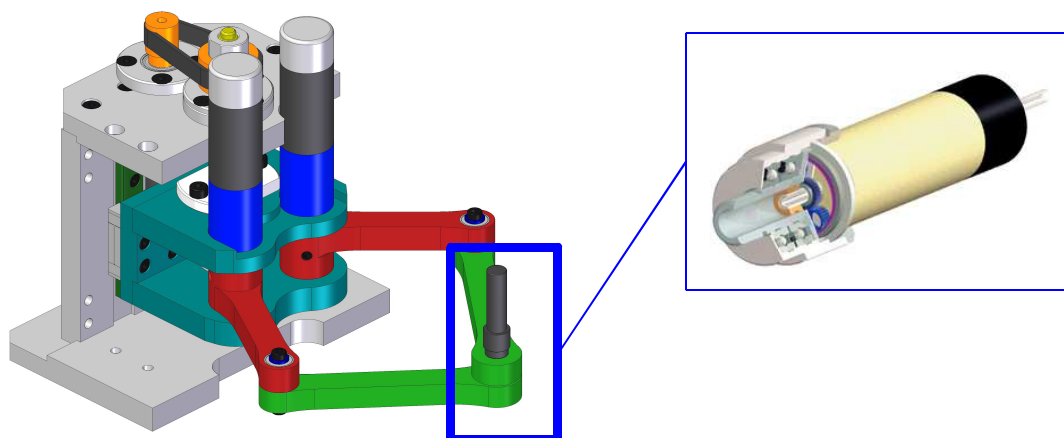


Figura 18 Particolare dell'asse  $\theta$  e del micro attuttore

#### 4.1.1 Attuatori

I motori posizionati a terra saranno dei micromotori Brushless a corrente continua (DC Brushless). Ogni motore sarà accoppiato ad un riduttore:

- Epicycloidale (giochi in funzione del modello, ingombranti)
- Harmonic drive (isteresi, ingombri contenuti)

La posizione angolare del motore è ottenuta accoppiando al motore un encoder rotativo (motore con albero posteriore).

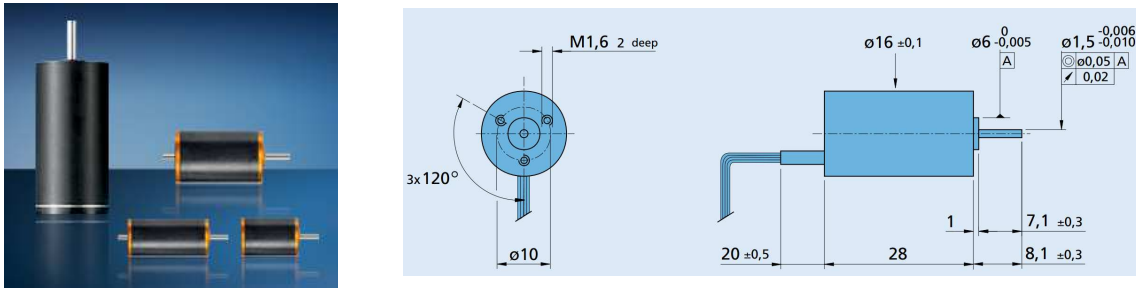


Figura 19 Micromotore della Faulhaber

## 4.2 Ingombri

Nella Figura 20 sono riportati gli ingombri del micromanipolatore preso in esame. le dimensioni dei link potranno subire alcune variazioni al termine della procedura di ottimizzazione, così come l'ingombro lungo Z, mentre riteniamo che l'ingombro della base (100x65 mm) rimanga invariato.

Per evitare interferenze con la piattaforma di orientamento la pinza dovrà avere un offset (di almeno 13mm) rispetto alla faccia inferiore del link.

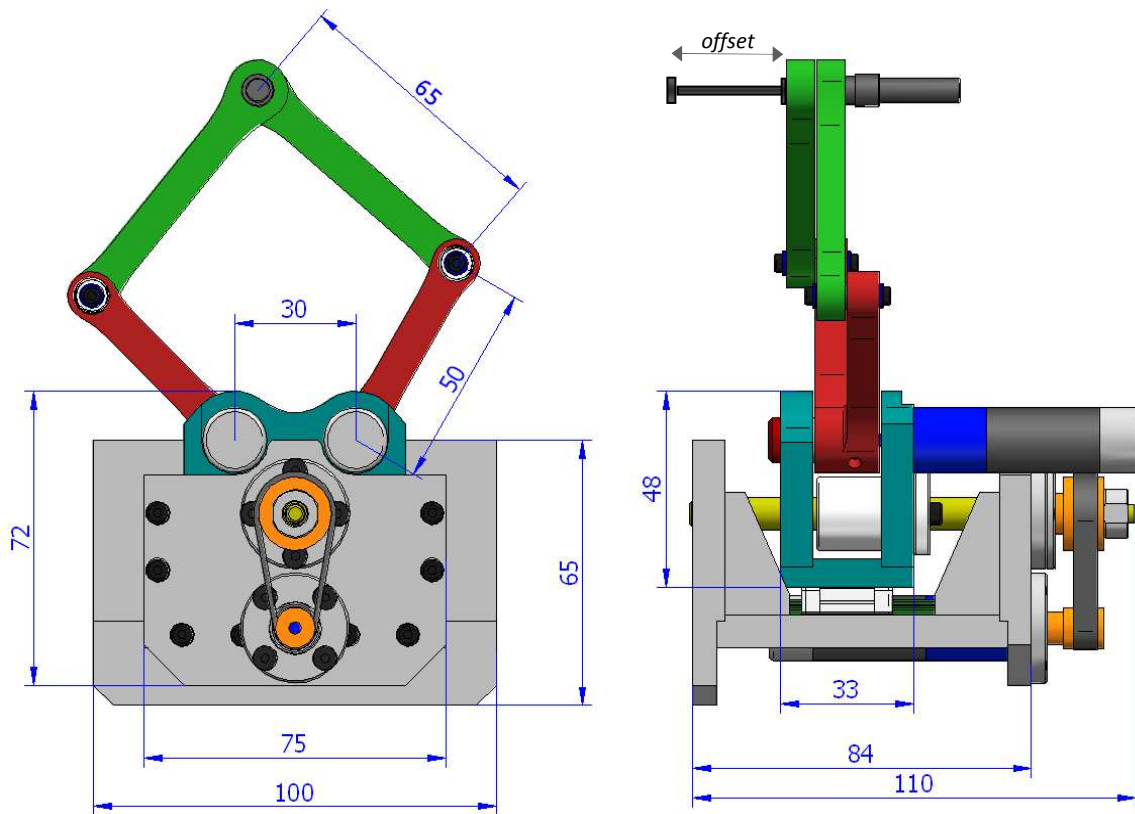


Figura 20 Ingombri del micromanipolatore