



Design and development of a 4DOFs micro-manipulator

Righettini, P, Zappa B, Ginammi A, Gotti A, Donadini D, Strada R

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Bergamo



MM&A

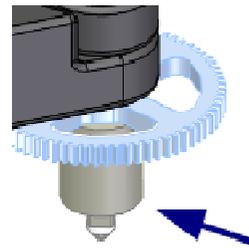
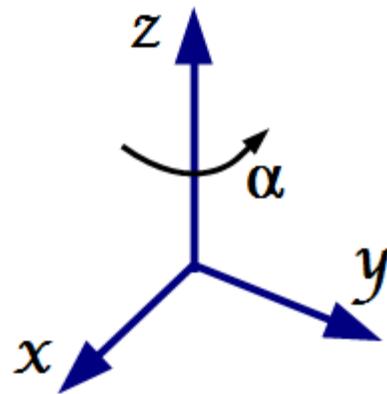
Micro Manipulation and Assembly

PRIN 2009 ottobre 2011-ottobre 2013

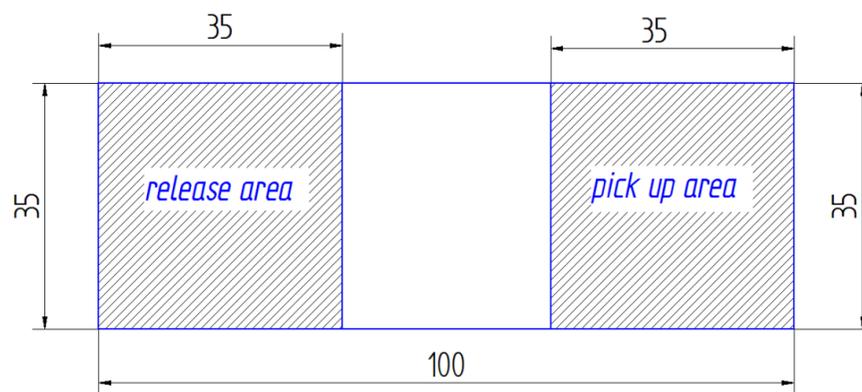
Compiti dell'Unità Operativa

Progettare e realizzare un minimanipolatore a **4 gradi di libertà** (x y z e rotazione α) per manipolare e assemblare microparti.

Il robot sarà integrato in un dimostratore finale (isola di assemblaggio)



TCP



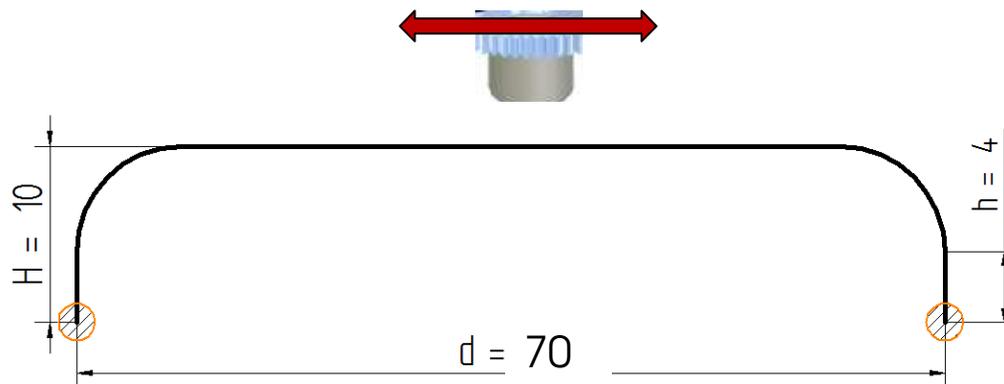
Area di lavoro

L'area di lavoro è un rettangolo di 35x100 mm.
Zone di **prelievo** e **rilascio** 35x35 mm.

Estensione in direzione **Z** almeno 20 mm

Prestazioni attese

- **Ripetibilità** nel piano xy attorno ai $10 \mu m$
- **Risoluzione** attorno ai $2 \mu m$;
- **Carico nominale** $10 g$,
- **Carico massimo** $100 g$.
- **Prestazioni dinamiche**: ciclo di riferimento di pick-and-place percorso con una frequenza attorno ad $1 Hz$, con carico nominale.
Al carico massimo tempo di percorrenza $10 s$



Ciclo di riferimento

- Lunghezza $d = 70 \text{ mm}$
- Altezza $H = 10 \text{ mm}$
- Altezza garantita lineare $h = 4 \text{ mm}$

Mini manipolatori a 4 dof

Seriali

➤ **SCARA**



YK120X

Yamaha Yk120X
Ripetibilità da catalogo **5 mm**

Altri produttori :
Mitsubishi Melfa RH-6SH5520 ,
Bosh Turboscara SR4,
Epson E2C251

Delta



Asyrl Pocket Delta
3dof - Rz opzionale
Ripetibilità di **2.5 mm**

IWF Parvus

Ripetibilità teorica di **5 mm**
Technical University Braunschweig,
Institute of Machine Tools and Production
Technology

Ibridi

Pentalatero



Mitsubishi Melfa RP-1AH
Ripetibilità di **5 mm**.

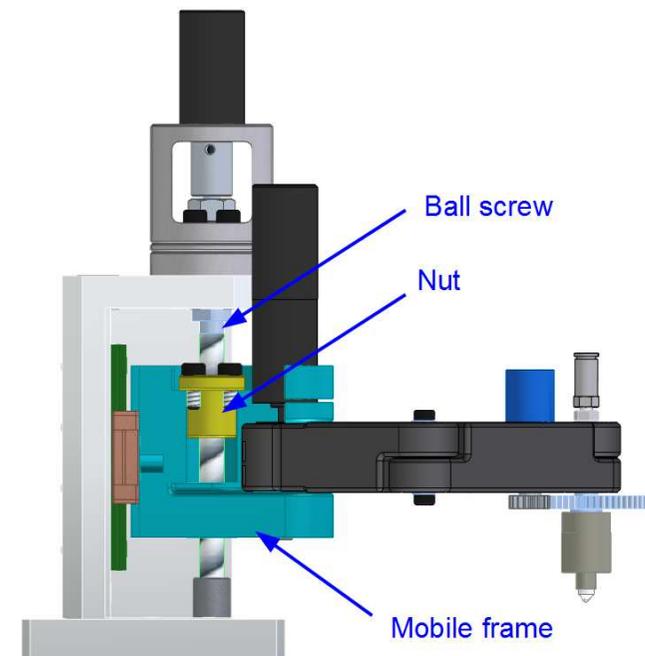
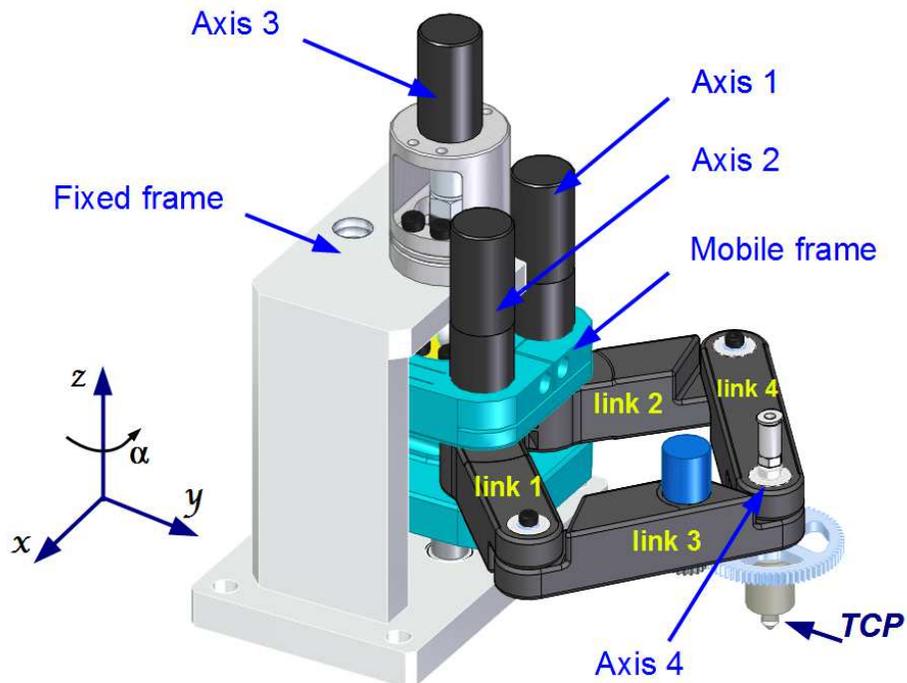




Architettura scelta

Struttura cinematica ibrida

- Il movimento del piano xy è delegato ad una struttura cinematica a **pentalatero**,
- Il movimento verticale (Z) è ottenuto muovendo il manipolatore lungo la direzione verticale
- La rotazione dell'end-effector (α) è realizzata da un attuatore a bordo del link 3 attraverso una coppia di ingranaggi.

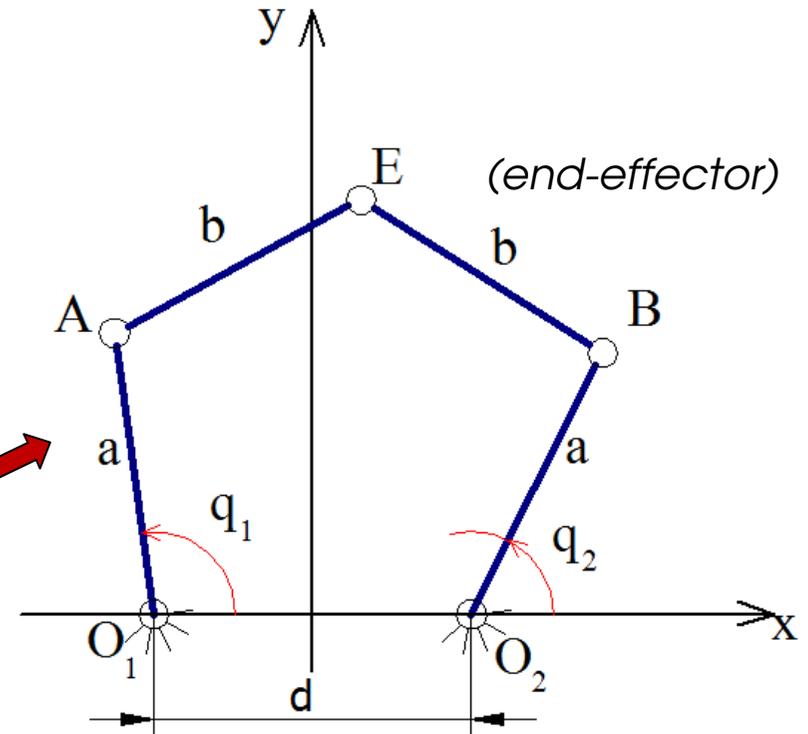
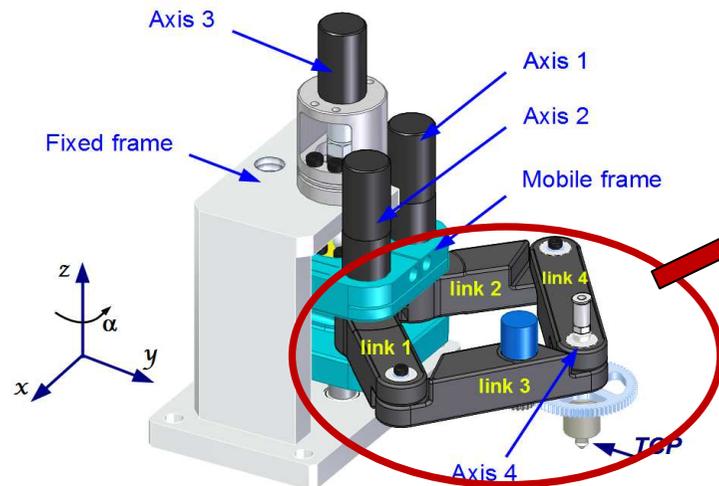


Struttura parallela

Per i movimenti nel piano XY
Struttura parallela a pentalatero

Parametri geometrici :

- a = lunghezza link prossimali
- b = lunghezza link distali
- d = distanza perni a terra



Sintesi dimensionale

Preso in esame la struttura parallela

Obiettivo:

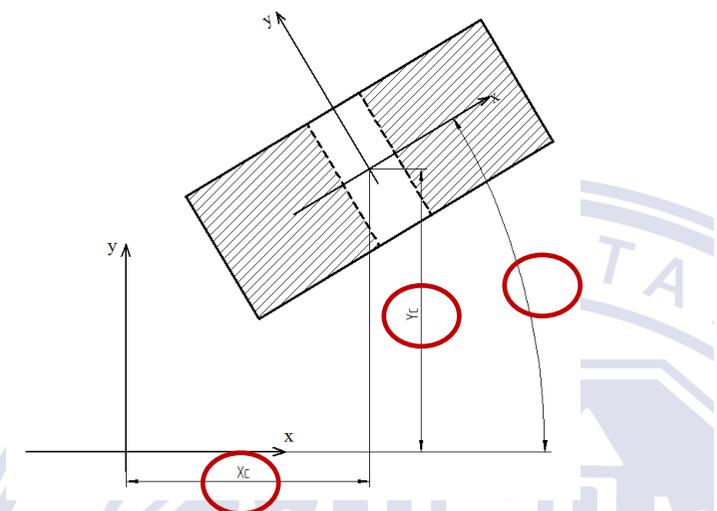
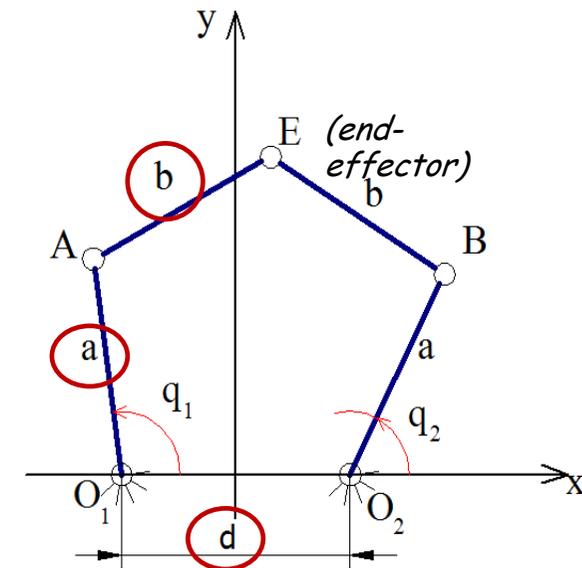
- ricavare i parametri cinematici dei link, e la posizione dei cerniere a terra in relazione all'area di lavoro.
- Il manipolatore dovrà avere di ingombro limitato

Vincoli:

- lo spazio raggiungibile dal manipolatore deve contenere l'area di lavoro.
- Le prestazioni dinamiche richieste devono essere ottenibili con i sistemi di azionamento reperibili in commercio

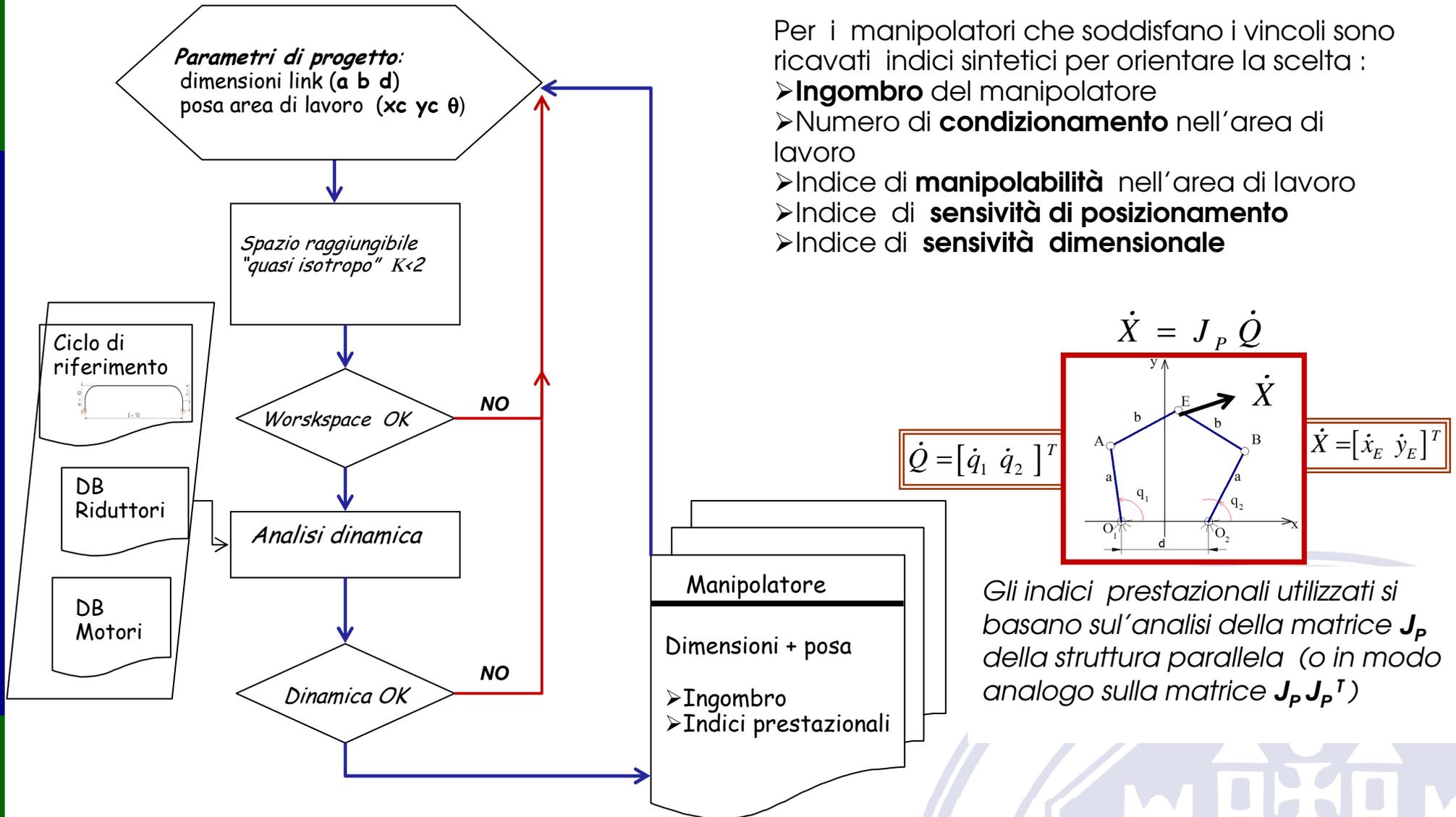
Parametri di progetto:

- dimensioni dei link della struttura parallela (a b d)
- posizione e orientamento dell'area di lavoro (x_c y_c θ)



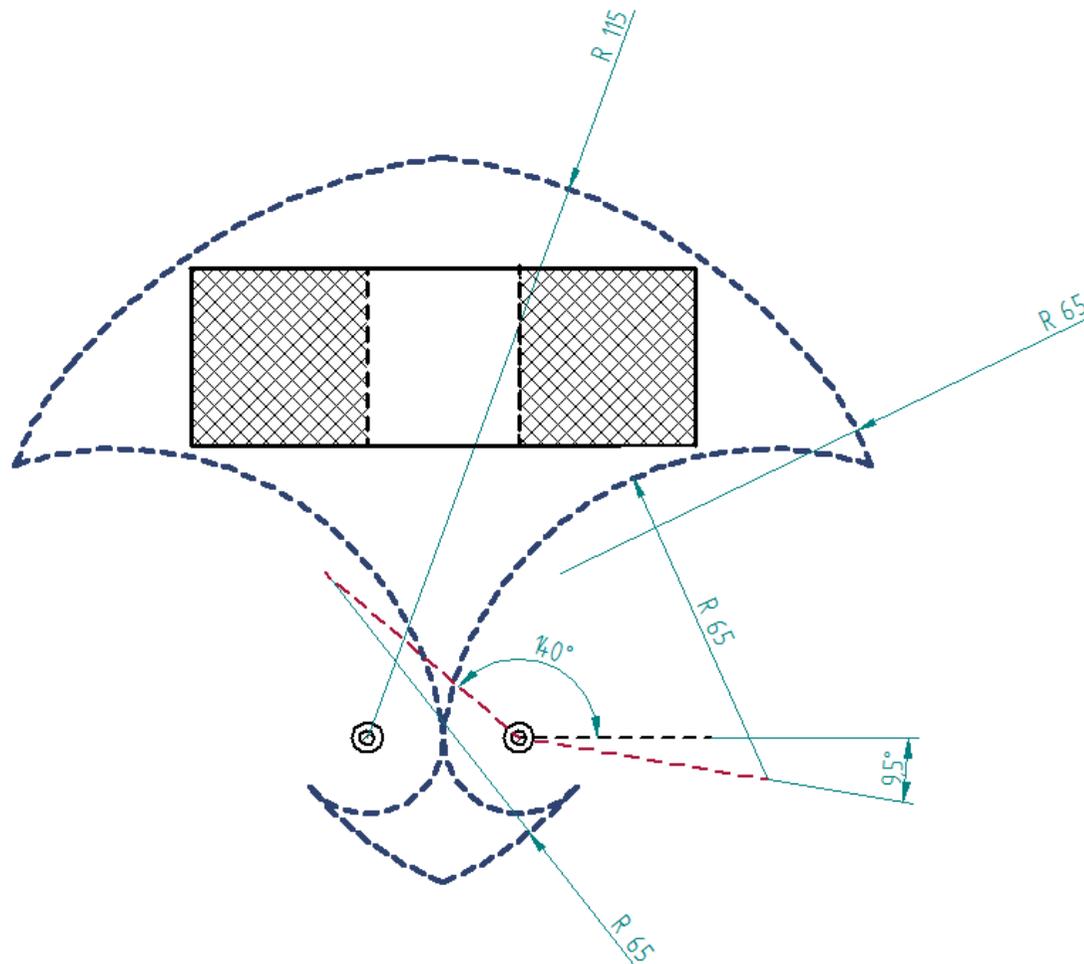


Algoritmo di sintesi



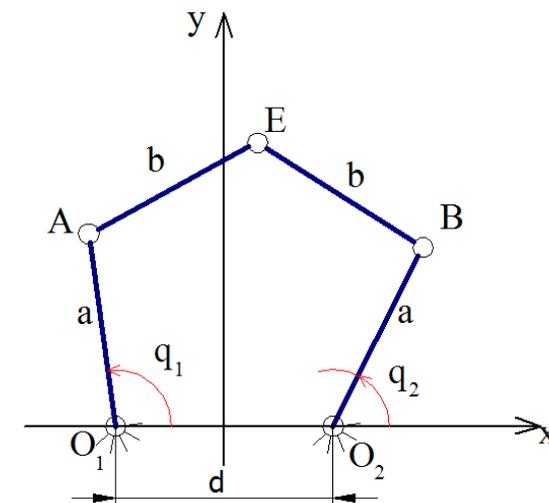
Spazio di Lavoro

I due giunti hanno stessi limiti di mobilità: $40^\circ < q_1 < 189.5^\circ$ e $-9.5^\circ < q_2 < 140^\circ$



Manipolatore scelto:

- $a = 50 \text{ mm}$
- $b = 65 \text{ mm}$
- $d = 30 \text{ mm}$
- $X_c = 0$
- $Y_c = 71$
- $\theta = 0^\circ$



Numero di condizionamento κ

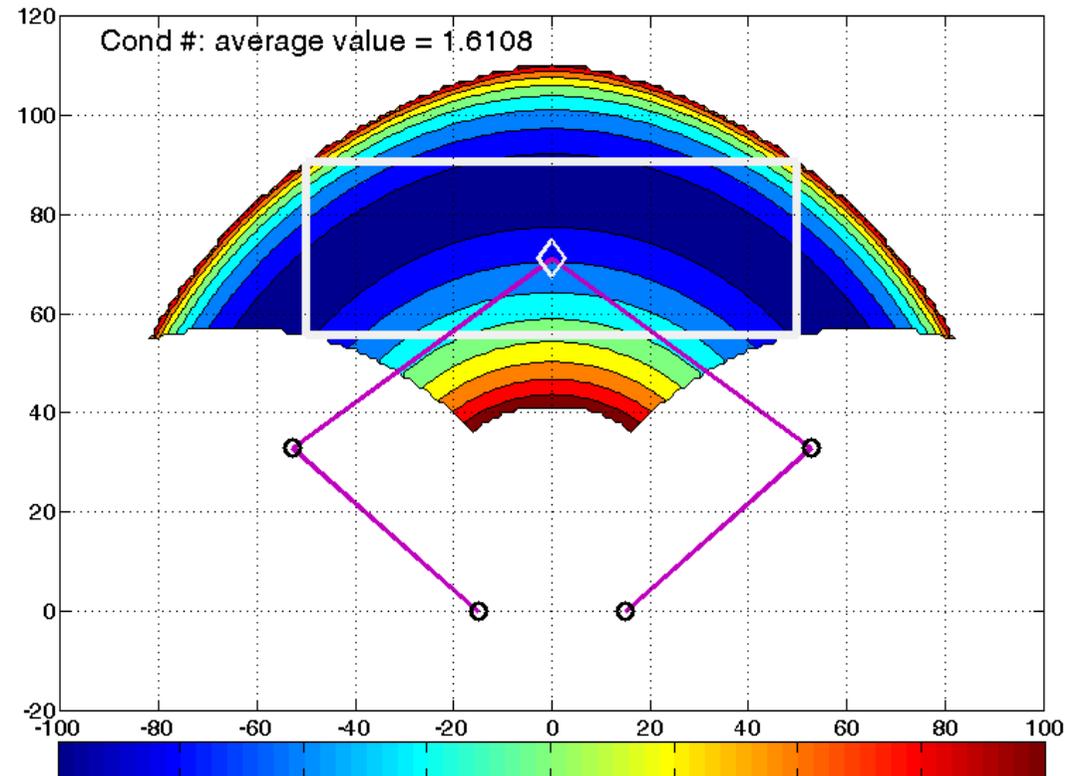
Calcolato in tutti i punti dell'area di lavoro.
Indice globale: valore medio nell'area.

Rapporto tra il massimo e il minimo
valore singolare di \mathbf{J}_P

$$\kappa = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \text{cond}(\mathbf{J}_P)$$

Oppure radice quadrata del rapporto
tra il massimo e minimo autovalore (λ) di
 $\mathbf{J}_P \mathbf{J}_P^T$

$$\kappa = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}}$$



Spazio di lavoro per $\kappa \leq 2$.

Valore medio di κ nel rettangolo di lavoro:

$$\kappa_m = 1.61$$



Indice di manipolabilità I_M (mm/rad)

Asse minimo dell'ellisse di manipolabilità
Calcolato in tutti i punti dell'area di lavoro.
Indice globale: valore medio nell'area.

Indice di manipolabilità I_M :

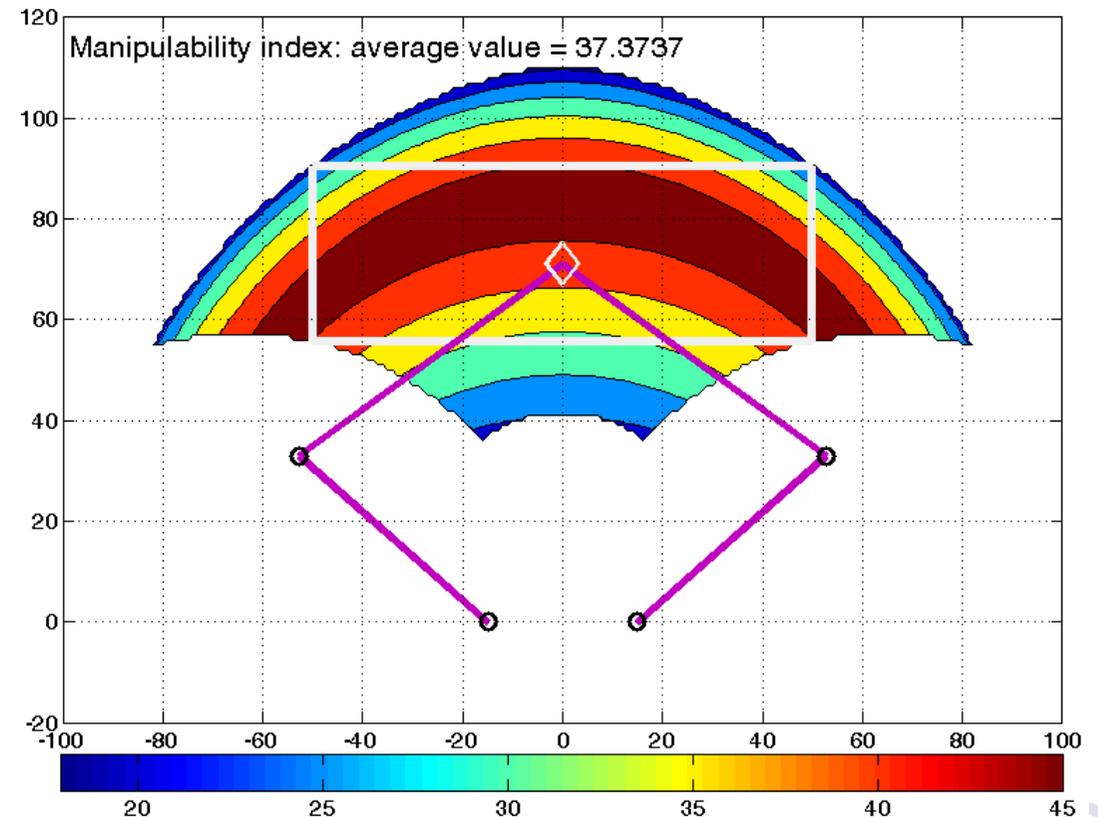
$$I_M = \sigma_{\min}$$

σ_{\min} è il minimo valore singolare di \mathbf{J}_P

oppure in modo equivalente:

$$I_M = \sqrt{\lambda_{\min}}$$

λ_{\min} è il minimo autovalore di $\mathbf{J}_P \mathbf{J}_P^T$



Indice di manipolabilità nello spazio di lavoro con $K < 2$.

Valore medio di I_M nel rettangolo di lavoro

$$I_M = 37.3 \text{ mm/rad}$$

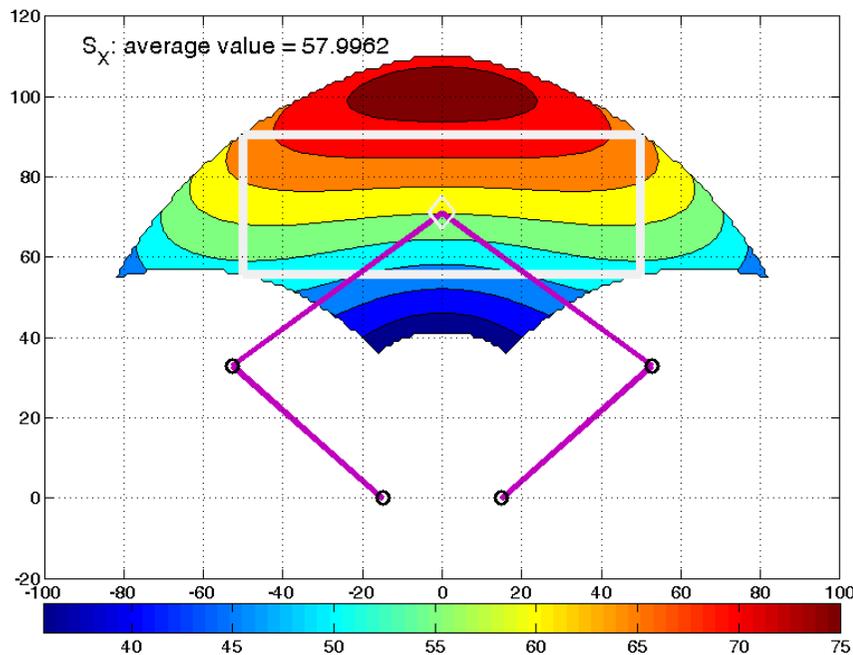


Sensitività $S_x - S_y$ (mm/rad)

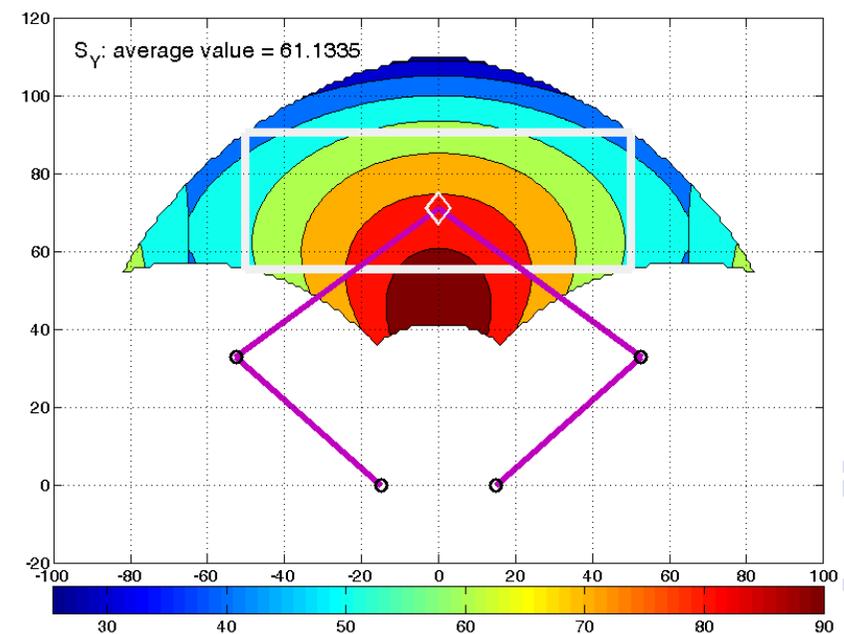
Sensitività di posizionamento: incertezza della posa del robot causata dall'incertezze ai giunti (calcolato in tutti i punti dell'ara di lavoro, indice globale valore medio)

La sensitività in direzione X e Y:
sommatoria dei valori assoluti degli elementi
della prima e della seconda riga di J_P

$$J_P = \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} \\ J_{2,1} & J_{2,2} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} S_x &= |J_{1,1}| + |J_{1,2}| = \sum_{c=1}^2 |J_{1,c}| \\ S_y &= |J_{2,1}| + |J_{2,2}| = \sum_{c=1}^2 |J_{2,c}| \end{aligned}$$



Sensitività in direzione X nello spazio di lavoro con $K < 2$.
Valore medio di S_x nell'area di lavoro: $S_x = 58$ mm/rad

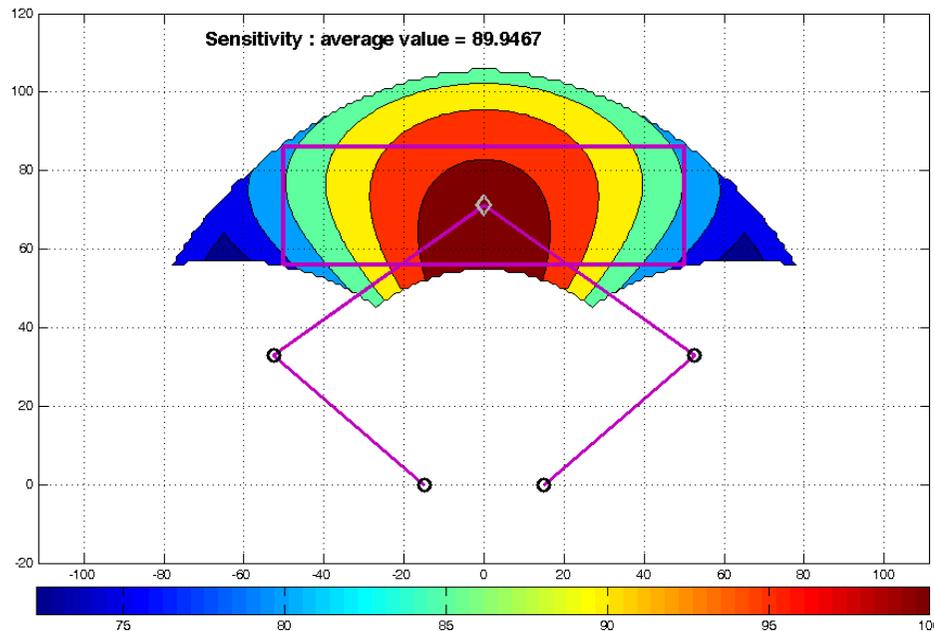


Sensitività in direzione Y nello spazio di lavoro con $K < 2$.
Valore medio di S_y nell'area di lavoro $S_y = 62$ mm/rad

Sensibilità complessiva S_{xy}

La misura di sensibilità può essere utilizzata per stimare la ripetibilità necessaria al giunto per avere la ripetibilità di posizionamento attesa

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



Sensibilità complessiva nello spazio di lavoro con $K < 2$.

Valore medio di S_{xy} nel rettangolo di interesse:

$$S_{xy} = 90 \text{ mm/rad}$$

Stima ripetibilità

Ripetibilità attesa: $r_{xy} = 10 \mu\text{m}$

Sensibilità media : $S_{xy} = 90 \text{ mm/rad}$

Ripetibilità richiesta al giunto (riduttore):

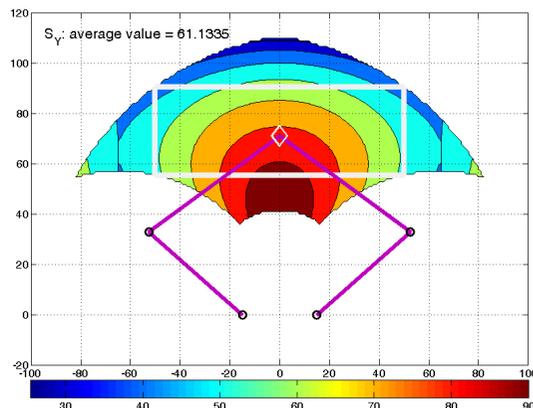
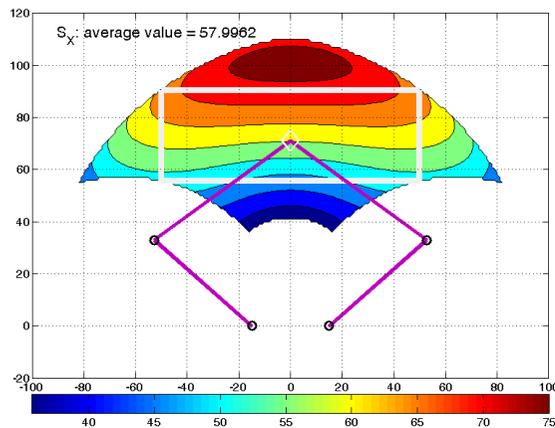
$$r_T = \frac{r_{xy}}{S_{xy}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{90} \cong 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \cong 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ deg}$$

Stima della risoluzione angolare

Sensibilità media in x : $S_x = 58 \text{ mm/rad}$

Sensibilità media in y : $S_y = 62 \text{ mm/rad}$

Risoluzione attesa in x e y : $R_w = 2 \mu\text{m}$



risoluzione angolare richiesta al giunto:

$$R_{qX} = \frac{R_w}{S_x} \approx 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

$$R_{qY} = \frac{R_w}{S_y} \approx 3.2 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

Ipotizzando una risoluzione angolare all'asse del motore di $n_M = 3000 \text{ step/rev}$

Si stima il rapporto di riduzione i necessario

$$i \geq \frac{n_{qY}}{n_M} = \frac{2\pi / R_{qY}}{n_M} \cong 64$$

Sensitività dimensionale S_L

Sensitività dimensionale: definita come l'incertezza della posa del robot causata dalle variazioni di lunghezza dei link

$$S_L = \frac{\partial X}{\partial L} \quad \text{con} \quad X = [x_E \ y_E]^t \quad L = [a \ b \ d]^t$$

Esempio: stima dell'influenza della temperatura sul posizionamento

Nella configurazione $x_E = 0$, $y_E = 71$ si ottiene:

$$S_L = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & \dots \\ -0.38 & 1.70 & \dots \end{bmatrix}$$

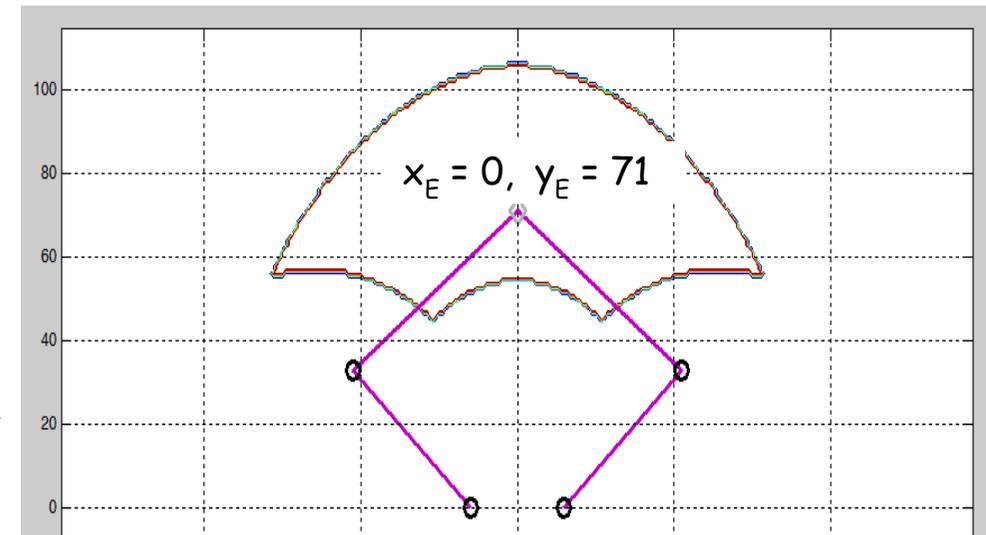
Ipotizzando il materiale alluminio, l'allungamento dei link diventa:

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

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

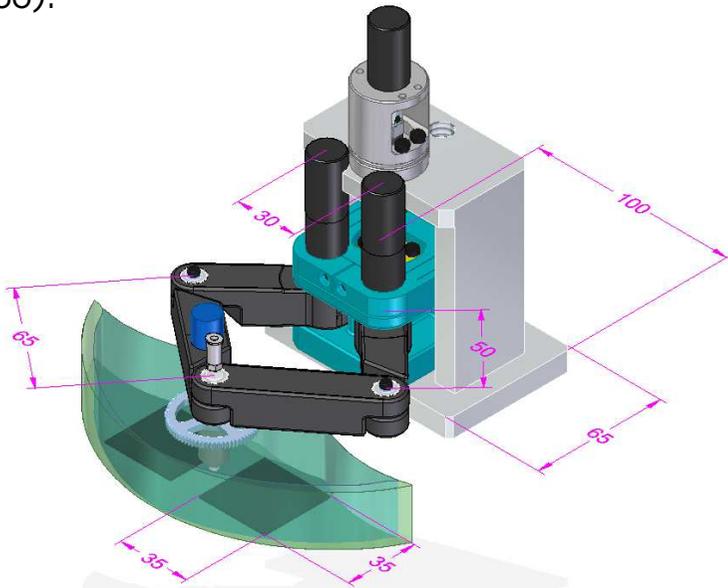
Errore dovuto alla dilatazione dei link :

$$\Delta X = S_L \ \Delta L = S_L \begin{bmatrix} \Delta a \\ \Delta b \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0.0 \\ 2.20 \end{bmatrix} \ \mu\text{m} / \text{C}^\circ$$



Prototipo preliminare

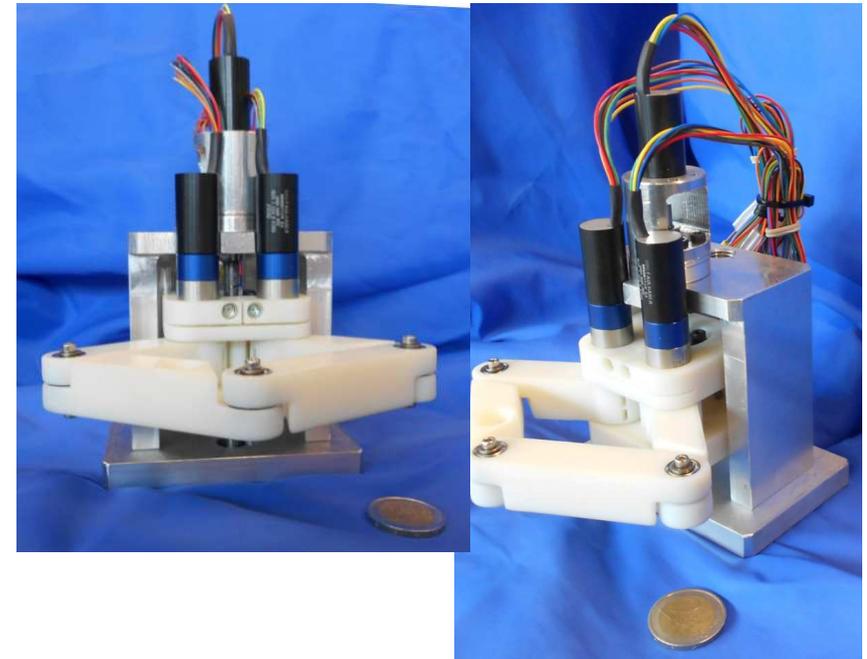
Prototipo preliminare: per verificare le strategie di controllo e per la messa a punto del sistema di misura delle prestazioni (misura sperimentale della ripetibilità UNI-EN-ISO 9283).



Il telaio mobile e i link sono realizzati in prototipazione rapida.

Materiale: "**VeroWhite**" resina epossidica con caratteristiche meccaniche simili ABS.

Resistenza a rottura 50 MPa, modulo di elasticità 2495 MPa.



Rapidità di realizzazione
Forme complesse
Costi contenuti.



Rigidezza modesta
Scarsa precisione dimensionale.

Traslazione verticale - Asse 3

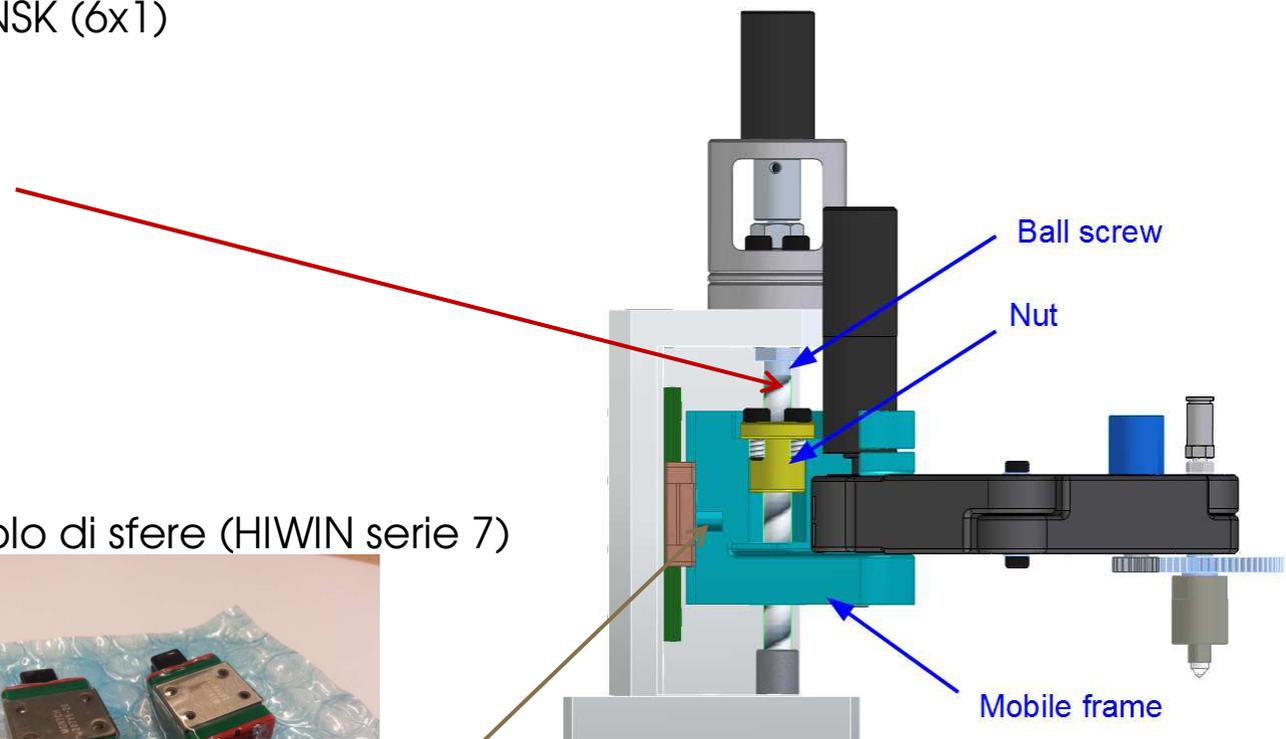
Il telaio mobile è attuato per mezzo di una micro-vite a ricircolo di sfere *NSK*

La direzione di traslazione è definita da due guide lineari con carrelli a ricircolo di sfere.

- Mini-vite a ricircolo di sfere *NSK* (6x1)



- guide lineari e carrelli a ricircolo di sfere (*HIWIN* serie 7)



Sistema di attuazione

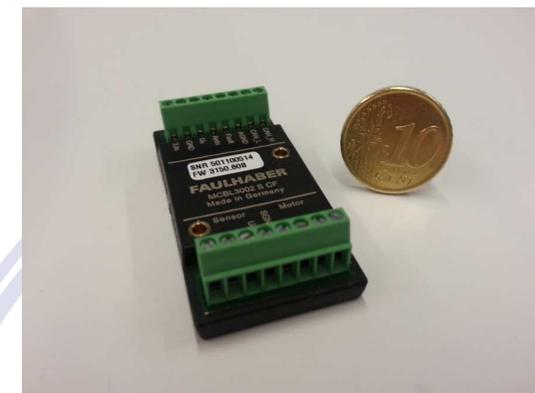
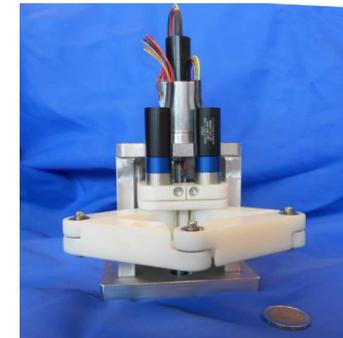
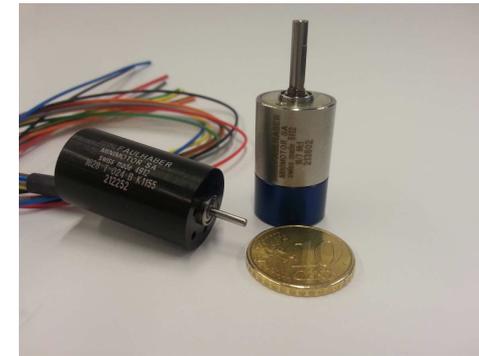
- Micromotori DC Brushless della **Faulhaber** con sensori analogici ad effetto Hall (risoluzione **3000 pulses/rev**).
- Micro riduttori epicicloidali Faulhaber

Struttura parallela: 2 servomotori **Faulhaber 1628-T024B** accoppiati con riduttore epicicloidale $i = 66:1$

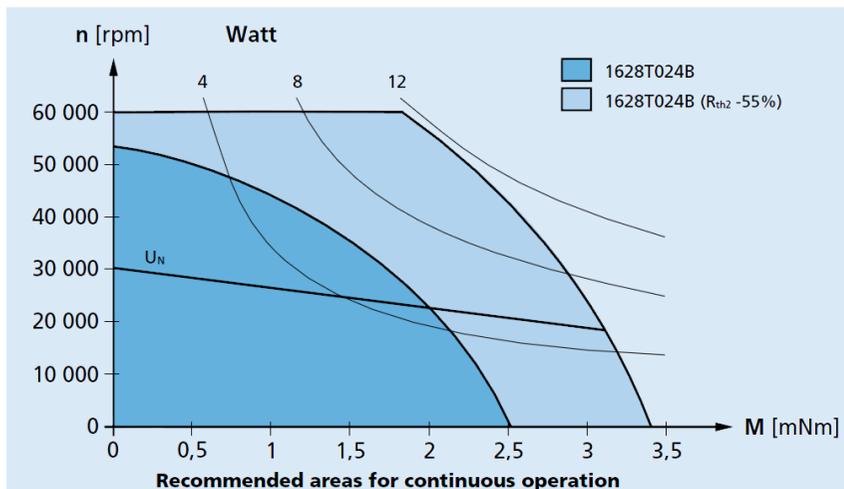
Rotazione end-effector: servomotore **Faulhaber 1226-T012B** accoppiato con riduttore epicicloidale $i = 16:1$

Traslazione Z: servomotore **Faulhaber 3056-K024B** ($C_N = 33 \text{ mNm}$) accoppiato direttamente con la vite a ricircolo di sfere

Ogni motore è comandato da un azionamento digitale **Faulhaber MCBL-3002** (interfaccia CANopen)



Sistema di attuazione



Faulhaber 1628-T024B



$$C_N = 2.6 \text{ mNm} \quad n_{max} = 30000 \text{ giri/min (a 24 V)}$$



Planetary Gearheads

0,3 Nm

For combination with
DC-Micromotors
Brushless DC-Motors
Stepper Motors

Series 16/7

	16/7					
Housing material	metal					
Geartrain material	steel					
Recommended max. input speed for:	5 000 rpm					
- continuous operation	≤ 1°					
Backlash, at no-load	ball bearings, preloaded					
Bearings on output shaft	≤ 30 N					
Shaft load, max.:	≤ 5 N					
- radial (6,5 mm from mounting face)	≤ 5 N					
- axial	≤ 5 N					
Shaft press fit force, max.	≤ 0,02 mm					
Shaft play	= 0 mm					
- radial (6,5 mm from mounting face)	- 30 ... + 100 °C					
- axial						
Operating temperature range						
Specifications						
Number of gear stages	1	2	3	4	5	6
Continuous torque	mNm 200	300	300	300	300	300
Intermittent torque	mNm 300	450	450	450	450	450
Weight without motor, ca.	g 18	23	28	33	38	43
Efficiency, max.	% 90	80	70	60	55	50
Direction of rotation, drive to output	=	=	=	=	=	=
Reduction ratio ¹⁾ (rounded)	3,71:1	9,7:1 14:1	43:1 66:1	94:1 112:1 134:1	415:1 592:1 989:1	2 608:1 4 365:1 5 647:1

Riduttore epiciclodale 16/7

$$i = 66$$

$$n_{max} = 5000 \text{ giri/min (continuativa)}$$

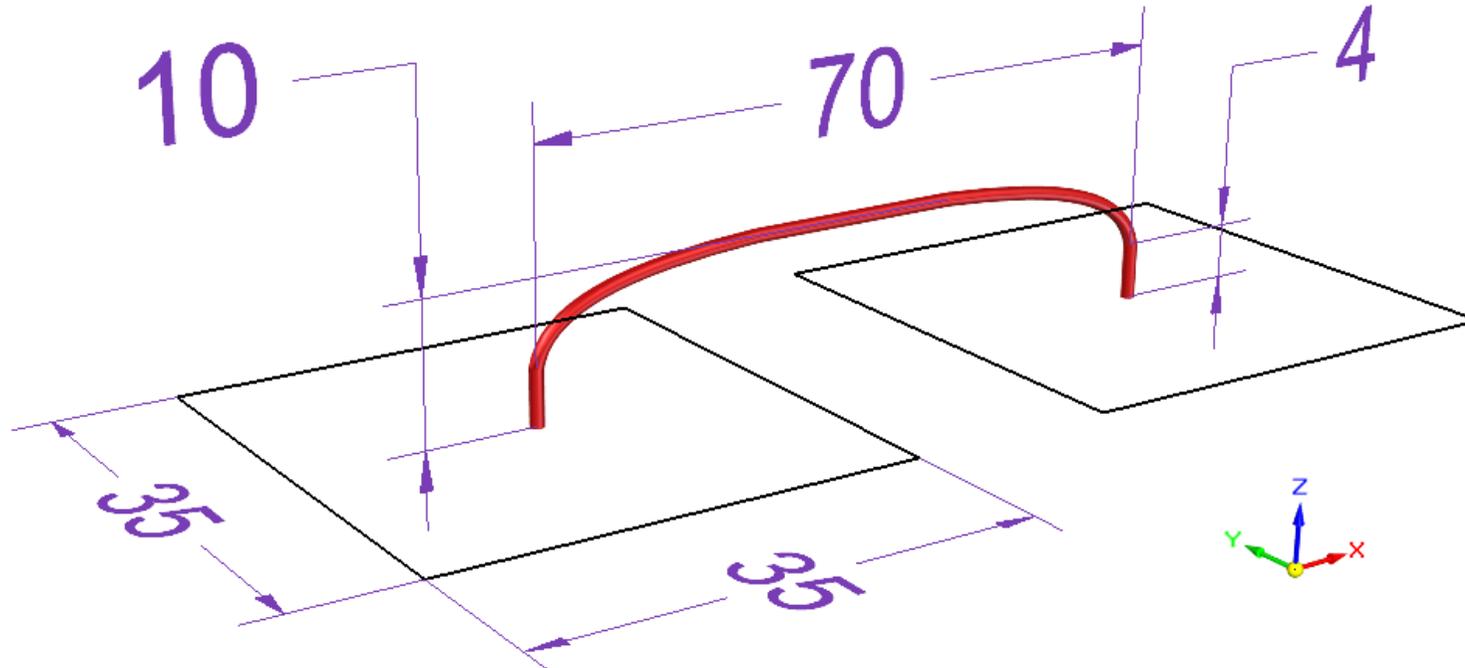
$$\eta = 0.7 \text{ (massimo)}$$

$$C_{max} = 300 \text{ mNm}$$



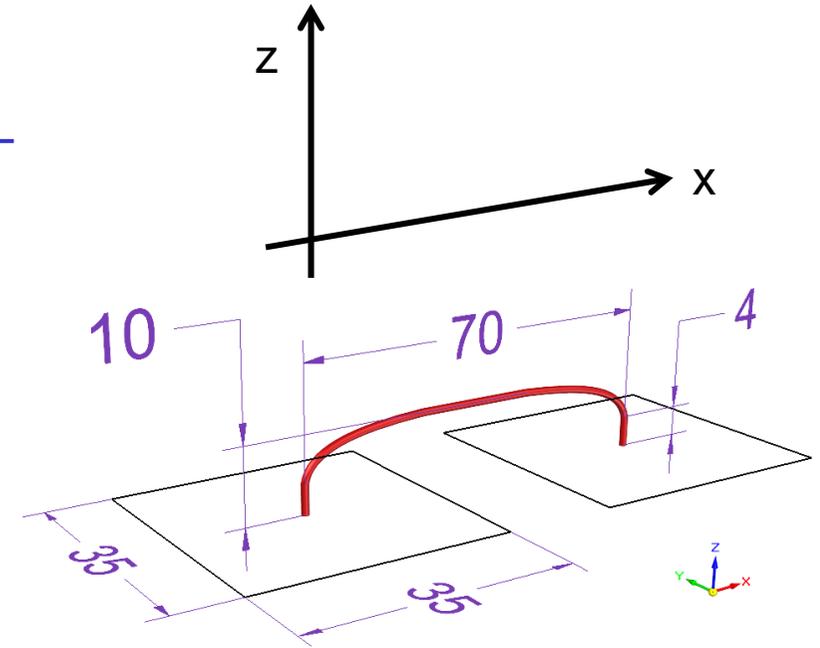
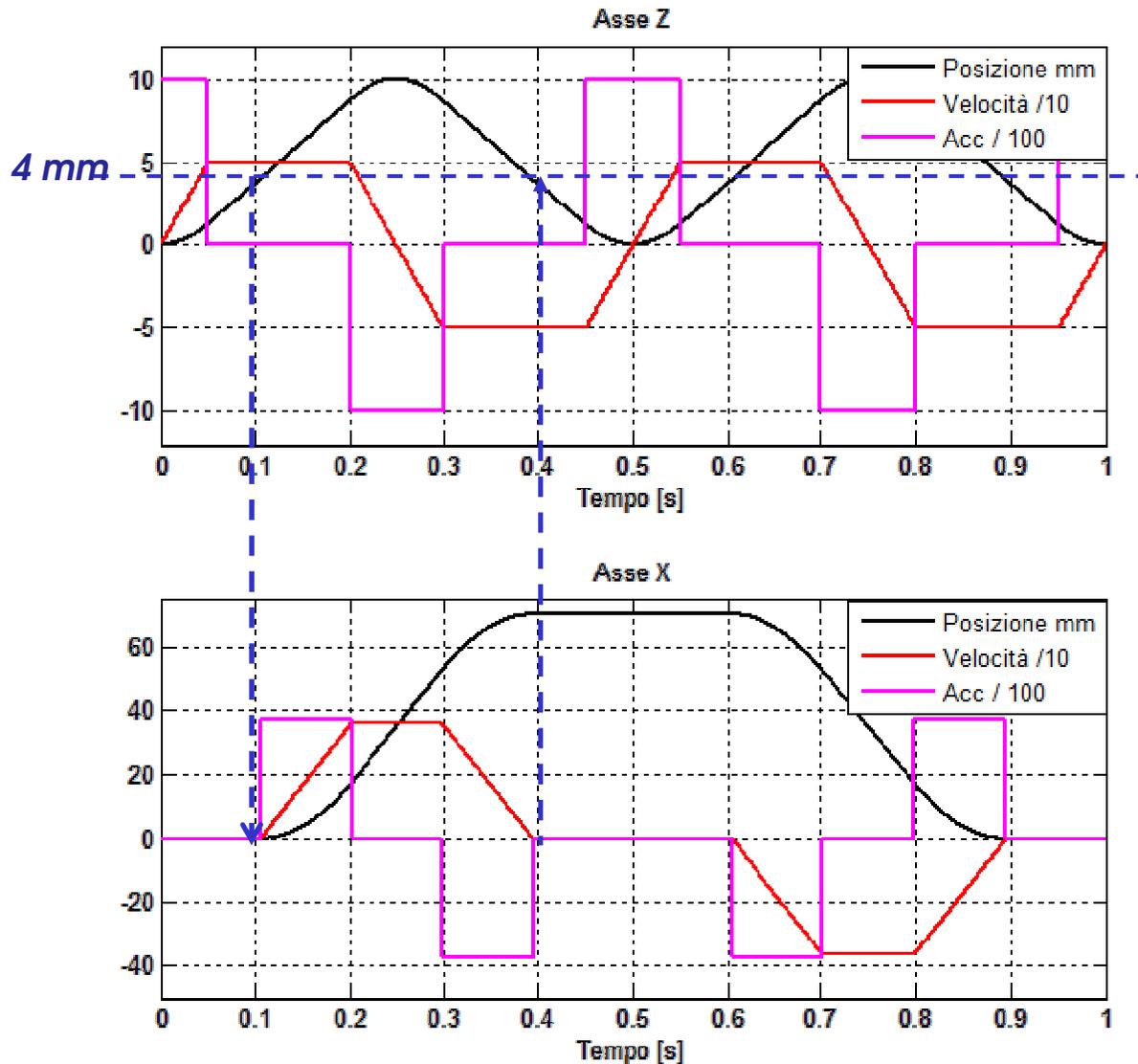
Analisi dinamica – scelta motori

- Ciclo di pick and place di riferimento (10 – 70 -10)
- Carico pagante: 10 g
- Tempo di ciclo: 1 s
- Inerzie link, end-effector, cuscinetti, forza peso, stima degli attriti nei giunti





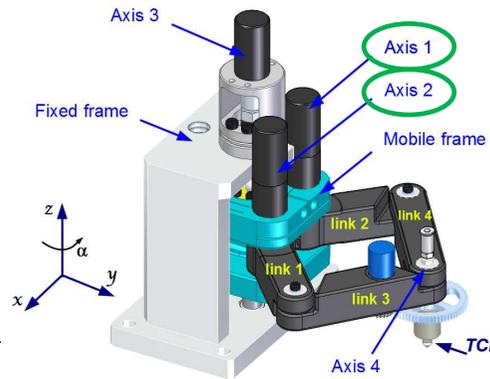
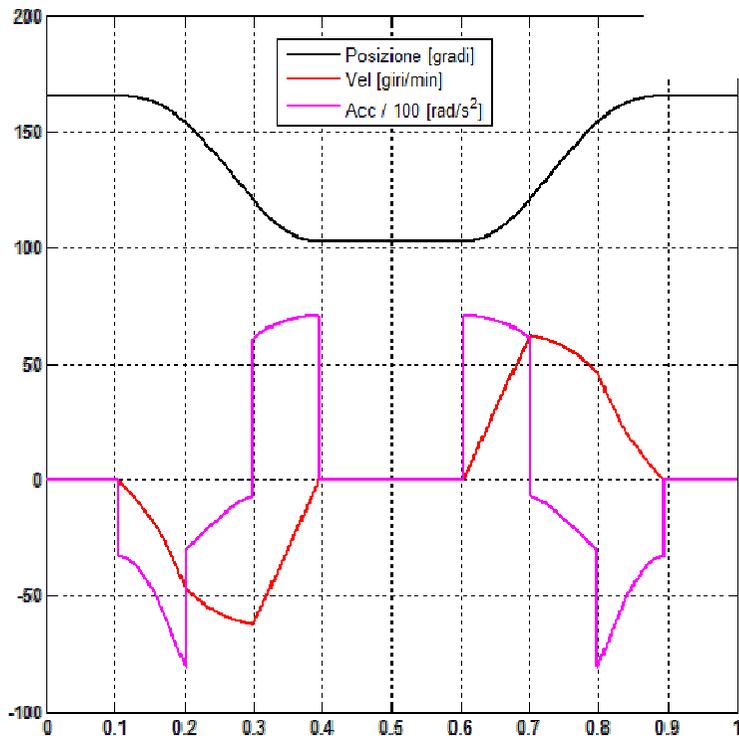
Leggi di moto all'end effector



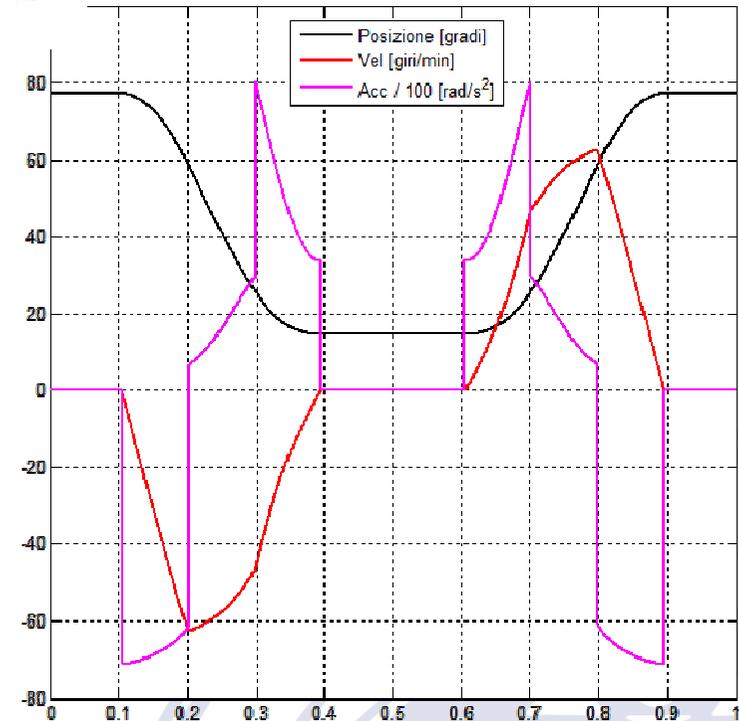
Traiettoria end-effector

Leggi di moto ai giunti

Asse 1

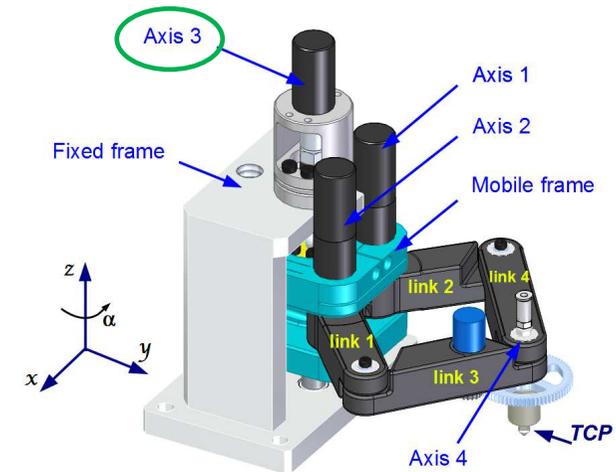
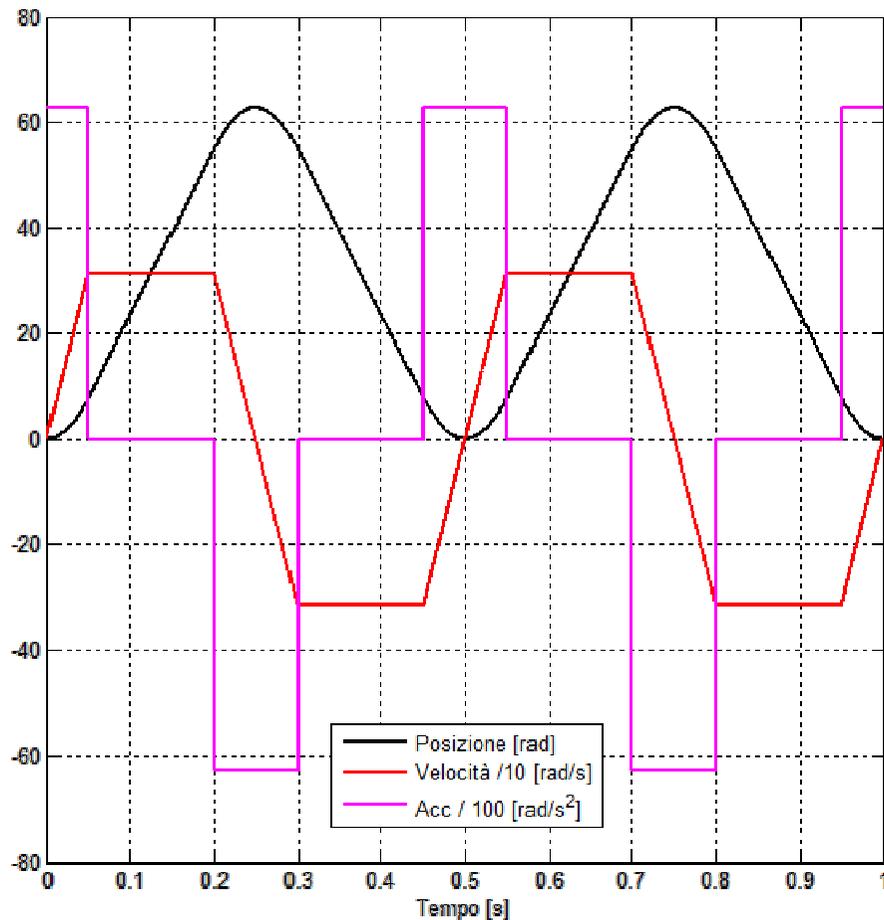


Asse 2



Leggi di moto ai giunti

Asse 3 (asse z)

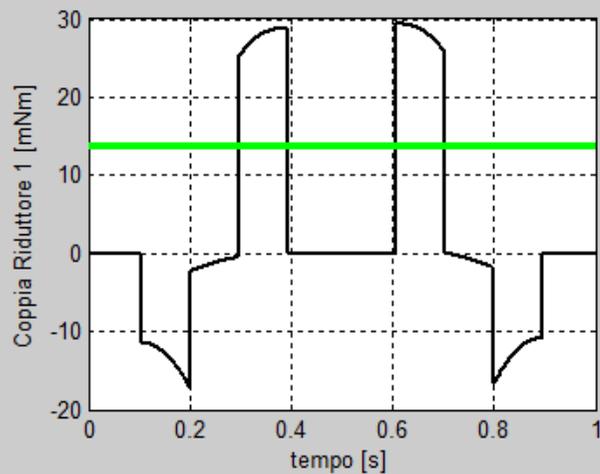


➤ $n_{\max} \approx 3000$ giri/min

Coppie lato carico

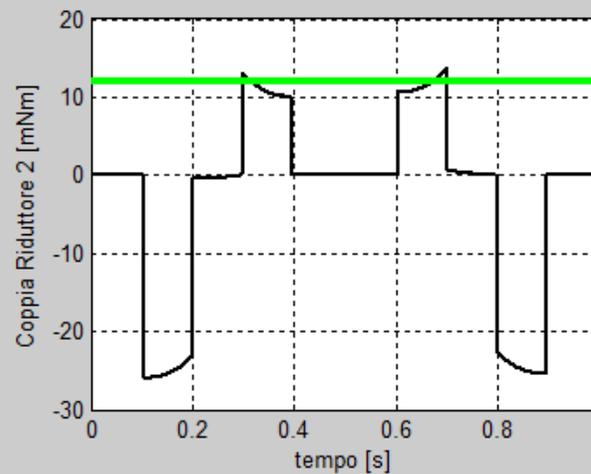
- Inerzie link, pinza, carico nominale, forza peso, stima degli attriti nei giunti

asse 1



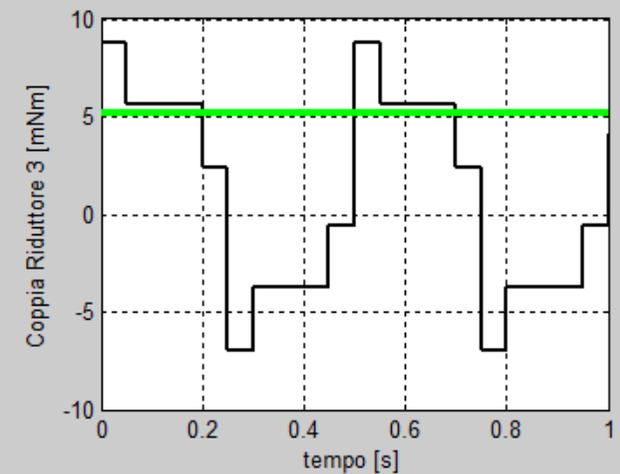
- $C_{\max} \approx 29 \text{ mNm}$
- $C_{\text{eff}} \approx 14 \text{ mNm}$

asse 2



- $C_{\max} \approx 25 \text{ mNm}$
- $C_{\text{eff}} \approx 12 \text{ mNm}$

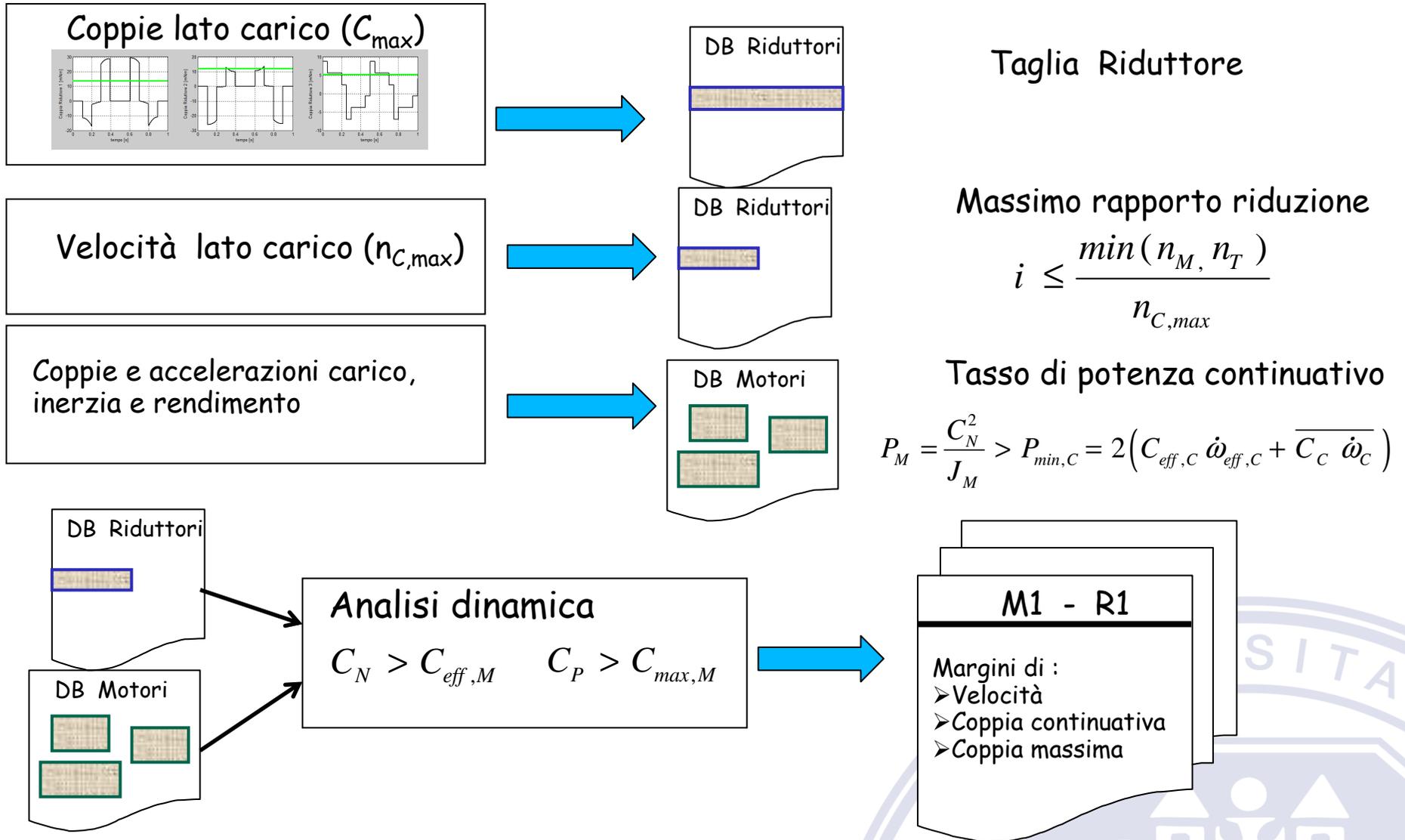
asse 3



- $C_{\max} \approx 8 \text{ mNm}$
- $C_{\text{eff}} \approx 5 \text{ mNm}$

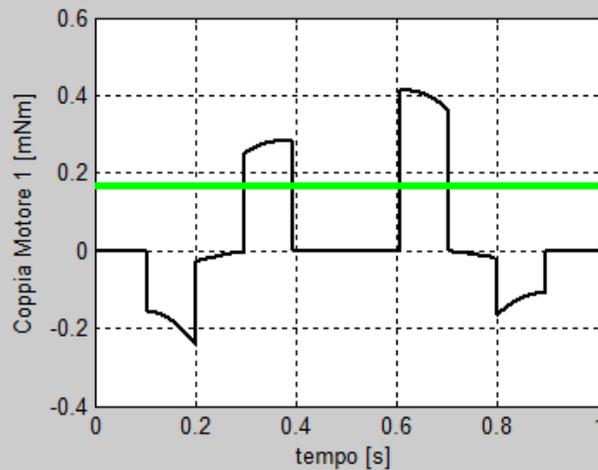


Selezione sistema di azionamento



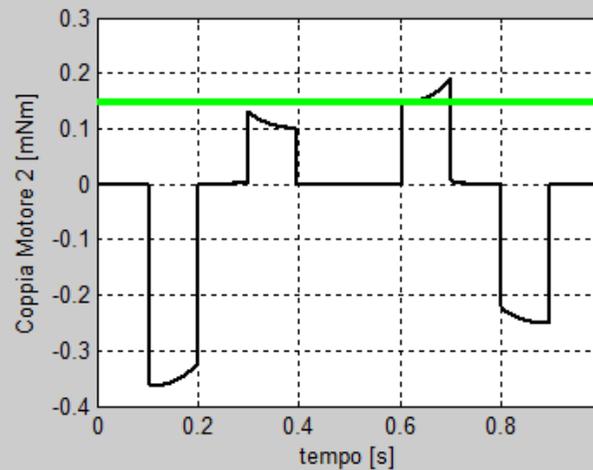
Esempio coppie lato motore

motore 1



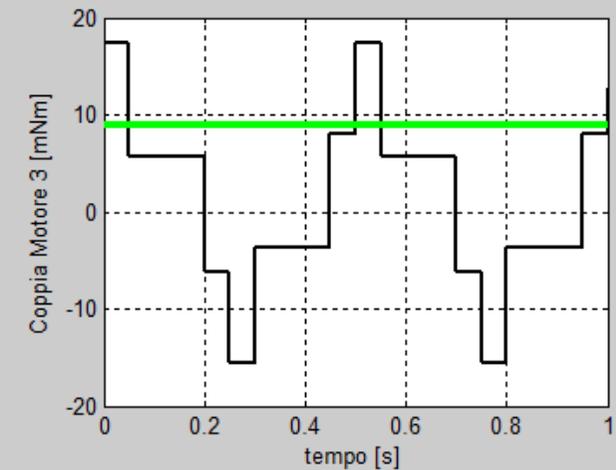
- $\tau = 1/66$
- $C_{\max} \approx 0.4 \text{ mNm}$
- $C_{\text{eff}} \approx 0.2 \text{ mNm}$

motore 2



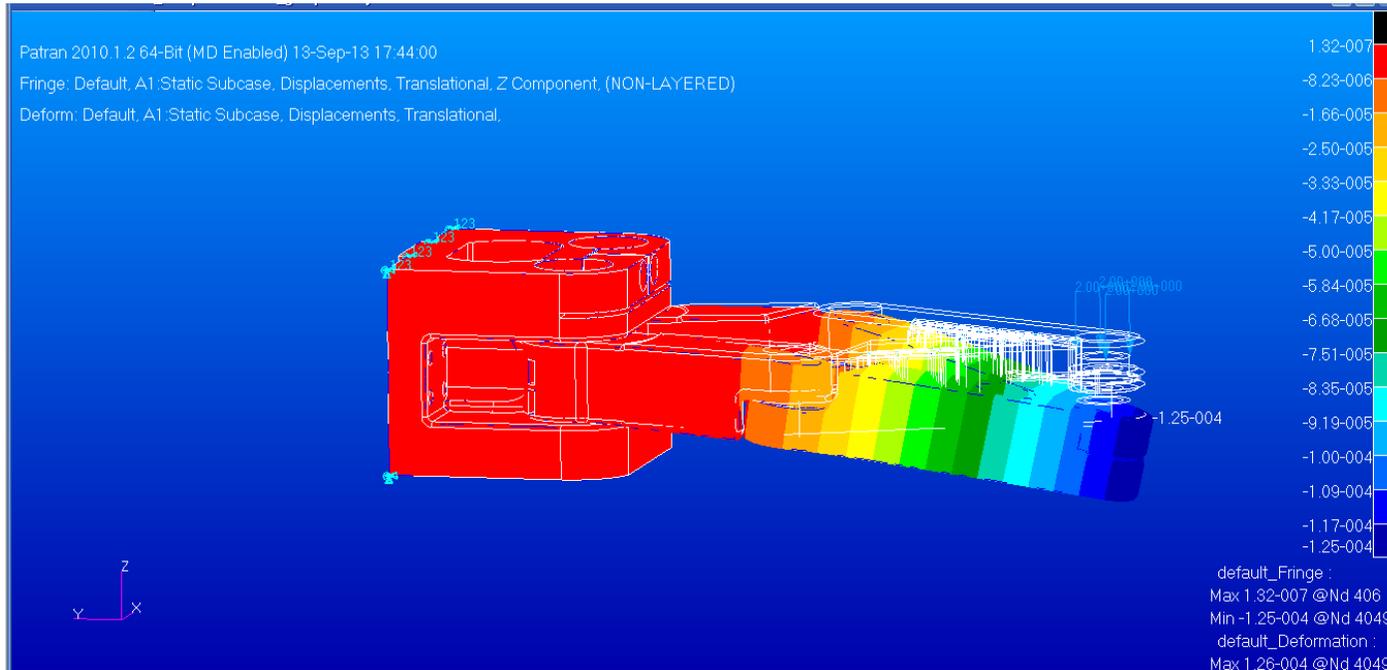
- $\tau = 1/66$
- $C_{\max} \approx 0.35 \text{ mNm}$
- $C_{\text{eff}} \approx 0.15 \text{ mNm}$

motore 3



- $\tau = 1$
- $C_{\max} \approx 18 \text{ mNm}$
- $C_{\text{eff}} \approx 10 \text{ mNm}$

Analisi FEM -deformazioni



Carico: 200g uniformemente distribuito sulla sede di appoggio del cuscinetto dell'end-effector. Il manipolatore è in posizione di massimo sbraccio

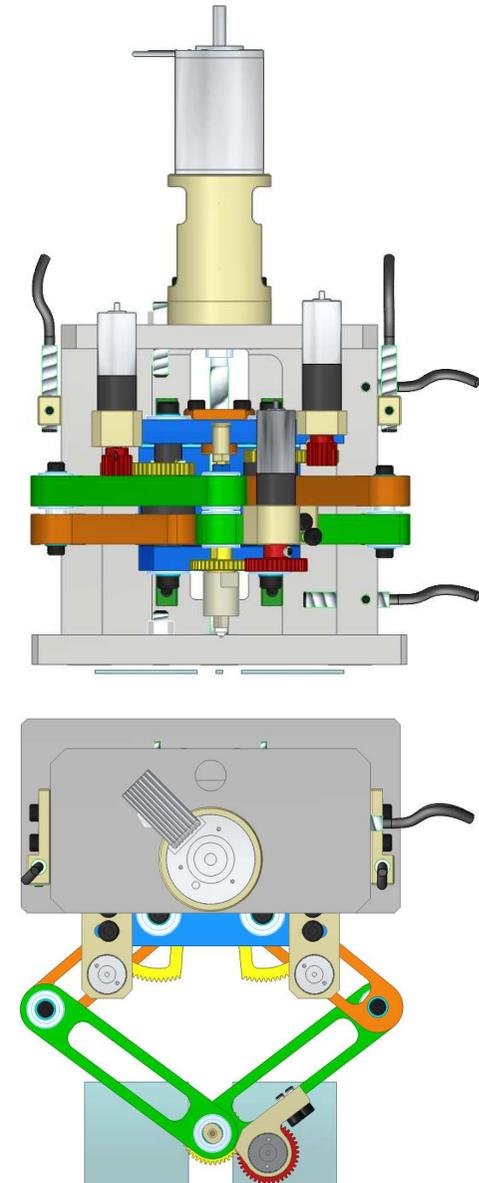
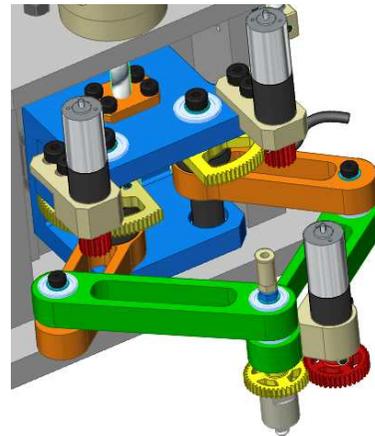
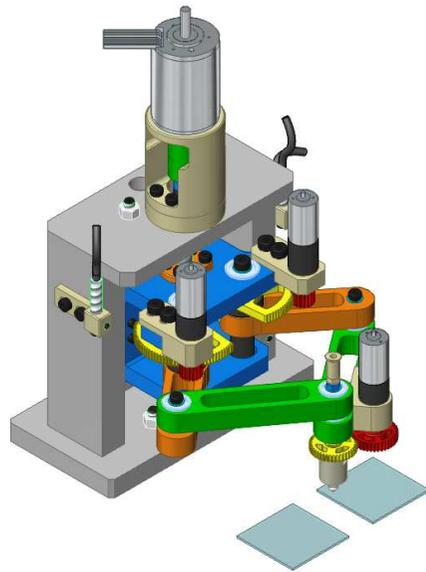
Deformata massimo = 125 micron

Sforzo massimo = 1.25 MPa

Manipolatore a rigidità migliorata

Link e telaio mobile in alluminio, modifica al progetto meccanico del sistema.

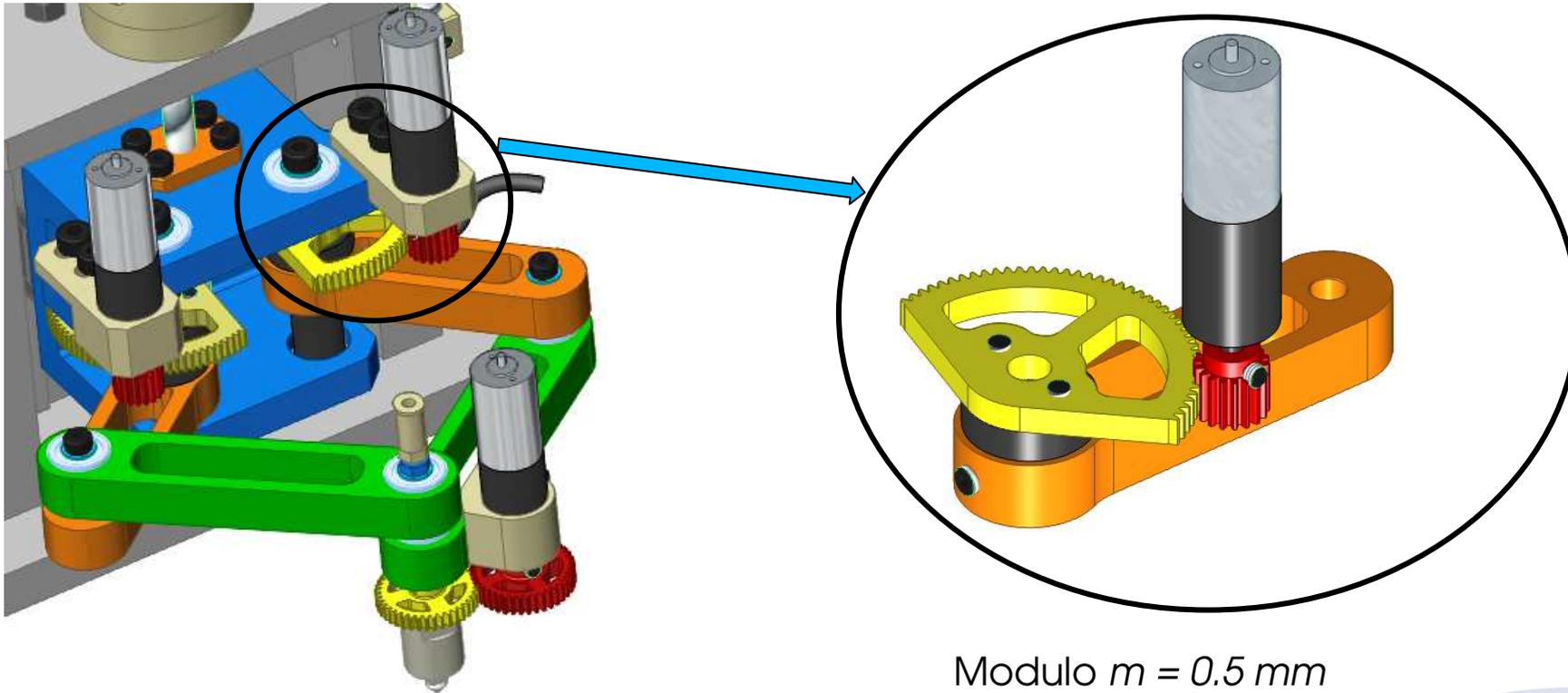
Materiale Anticorodal 6082-T6,
 $R_s = 260\text{MPa}$; Modulo di elasticità = 69000MPa ;



Link in alluminio:
 Massa = 20g; $J_z = 39.4\text{ kg/mm}^2$

Link resina:
 Massa = 9,6g; $J_z = 14,57\text{ kg/mm}^2$

Configurazione meccanica assi 1 -2



Tra asse del motore e asse del giunto
 inserita una coppia di ruote dentate
 Soluzione adottata per ridurre l'effetto
 dei giochi del riduttore commerciale.

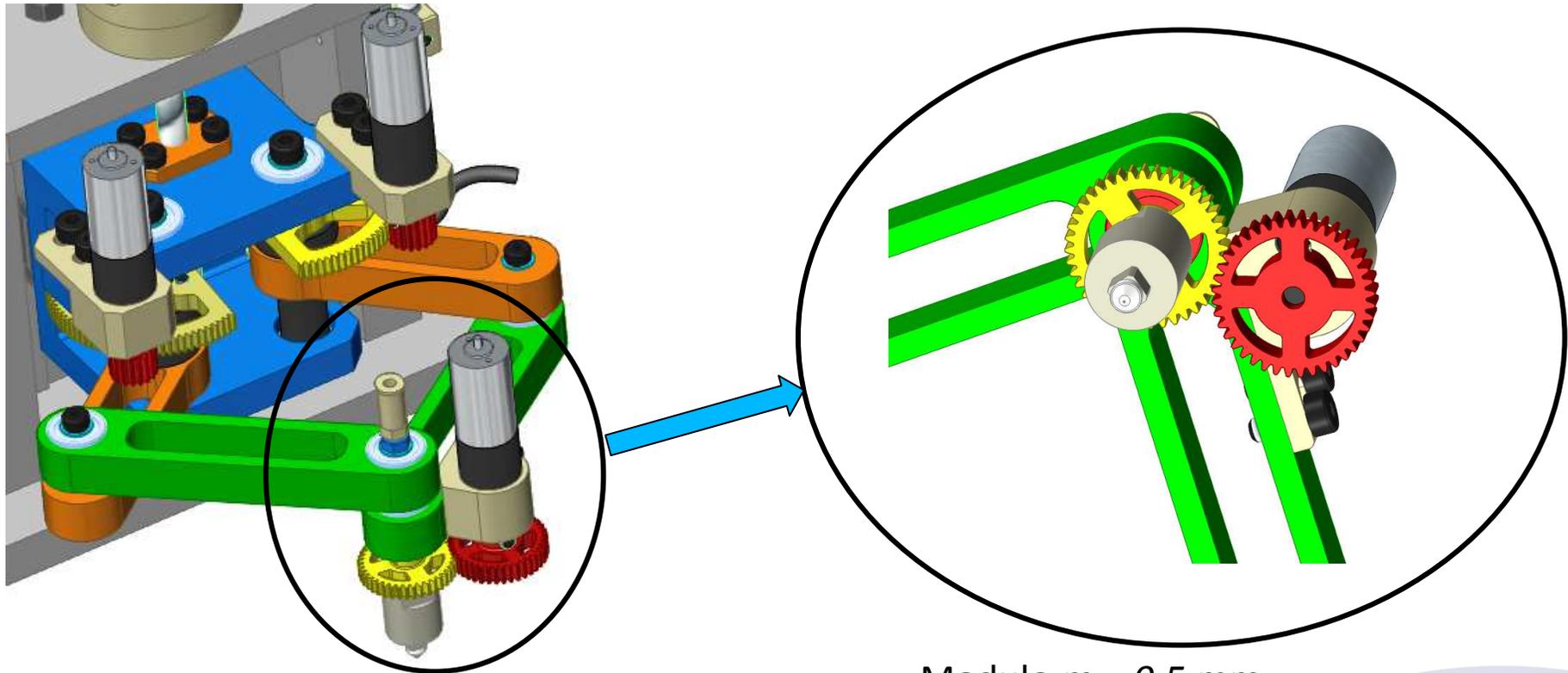
Modulo $m = 0.5 \text{ mm}$

Z_m ruota motrice = 18

Z_c settore dentato = 90

Rapporto trasmissione $\tau = 1/5$

Configurazione meccanica asse 4

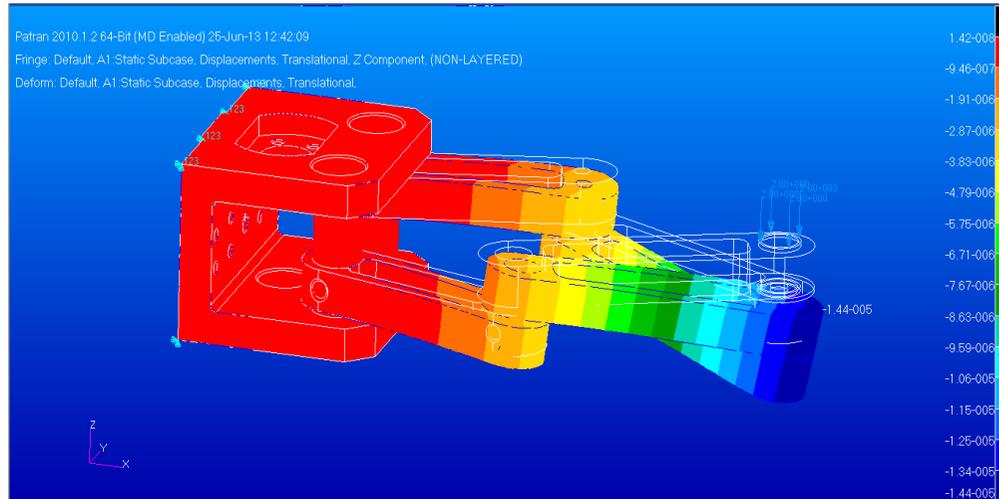


Modulo $m = 0.5 \text{ mm}$

$Z_m = Z_c = 40$

Rapporto trasmissione $\tau = 1$

Analisi FEM confronto

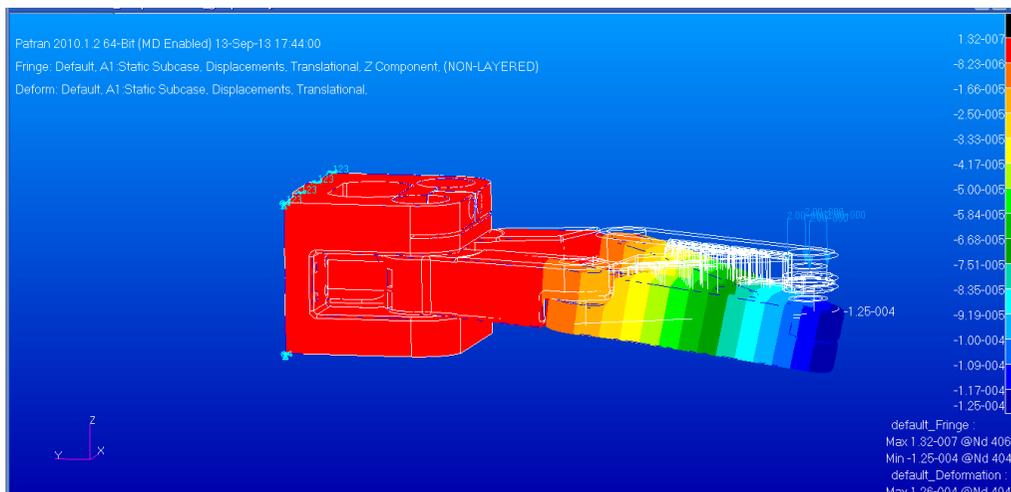


Carico: 200g

Link in **alluminio**

Deformata max = **14.4** micron

Sforzo max = 1.45 MPa



Carico: 200g

Versione link in **resina**

Deformata max = **125** micron

Sforzo max = 1.25 MPa

Conclusioni

- Sviluppato una procedura per il progetto di questa classe di minimanipolatori e realizzato un codice dedicato alla sintesi.
- La metodologia è stata applicata per la progettazione di 2 dimostratori:
 - Prototipo preliminare con componenti in resina (*rapid prototyping*), per la verifica delle strategie di controllo e la messa a punto del sistema di misura delle prestazioni.
 - Prototipo a rigidità maggiorata (componenti in alluminio): ultimato il progetto di dettaglio e i disegni costruttivi.

Tempistiche:

- Stiamo lavorando alla parte di controllo e prevediamo di “muovere” il manipolatore per la fine settembre.
- A metà ottobre è prevista la consegna dei componenti per il manipolatore in alluminio.

