



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΛΈΓΧΟΥ ΚΑΙ  
ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Έλεγχος Δυναμικής Εμπέδησης  
Επιδέξιας Ρομποτικής Λαβής στο  
Πλαισιο του Χειριζόμενου  
Αντικειμένου

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνου Π. Βάσιου

# Περιεχόμενα

- \* Πλαίσιο, Κίνητρο, Στόχοι, Συνεισφορά
- \* Βασική Θεωρητική Ανάλυση
- \* Υλοποίηση - Αποτελέσματα

# Κίνητρο



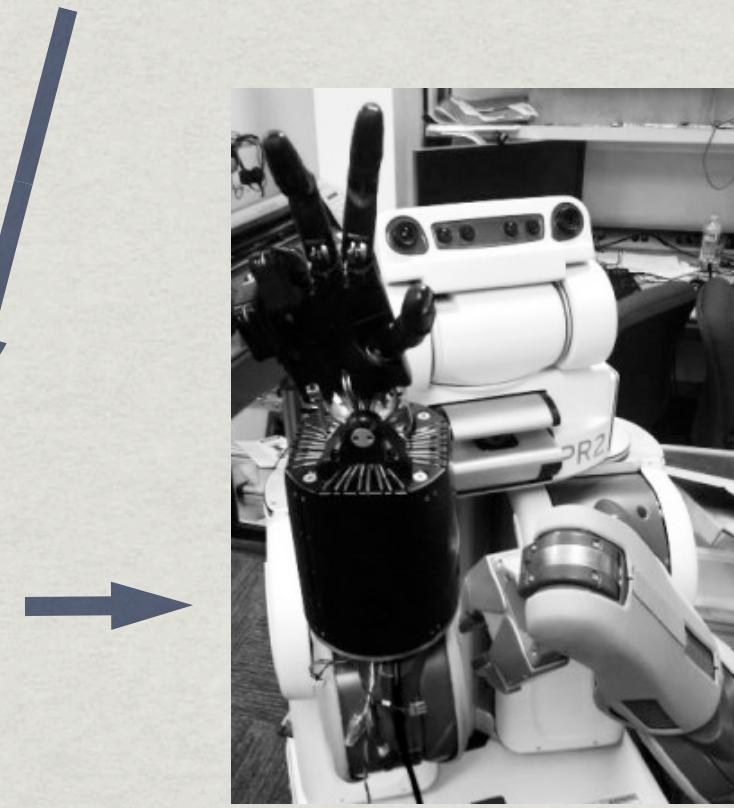
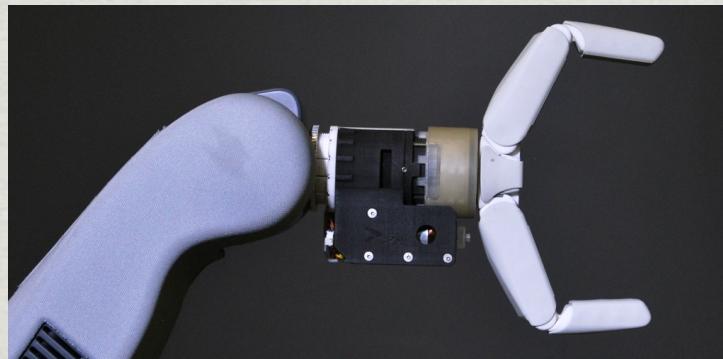
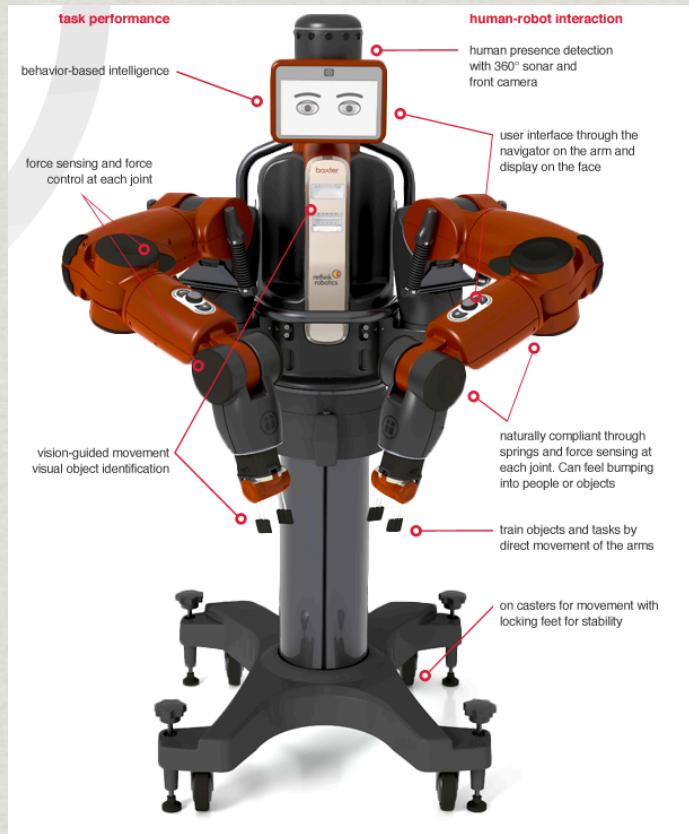
# Αποδόμηση - Προβλήματος Χειρισμού

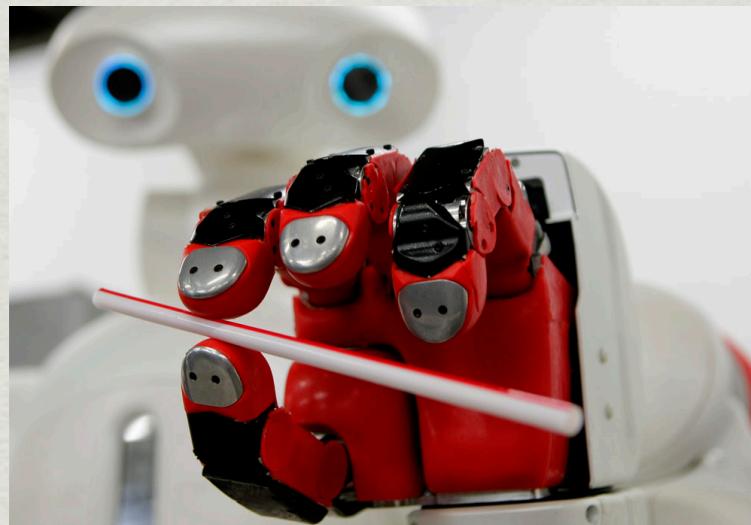
- \* Προσέγγιση του αντικειμένου-επιφάνειας στόχου
- \* Πραγματοποίηση επαφής και άρα συγκεκριμένος περιορισμός στη κίνηση μέσω ανταλλαγής δυνάμεων
- \* Διαδικασία χειρισμού

Επιδεξιότητα

Εστιάζουμε!

Αναφέρεται στην ικανότητα αλλαγής θέσης και προσανατολισμού του αντικειμένου υπό χειρισμό από μία αρχική διάταξη αναφοράς στο χώρο σε μία άλλη τυχαία ορισμένη μέσα στο χώρο εργασίας των δακτύλων.





### DLR German Aerospace Center Hand



### 19 DoF Hand

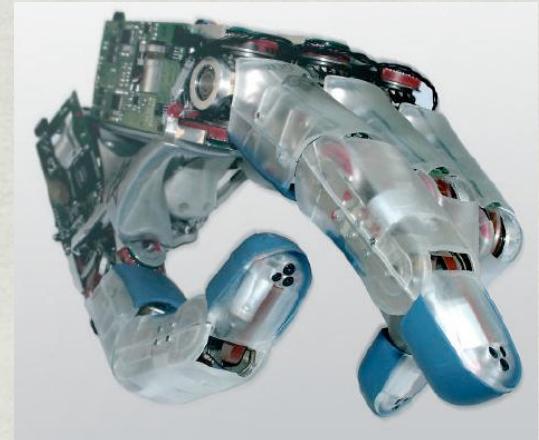
44 intelligent motor modules with integrated power inverters and 180 W peak power each

in-tendon progressive spring mechanism

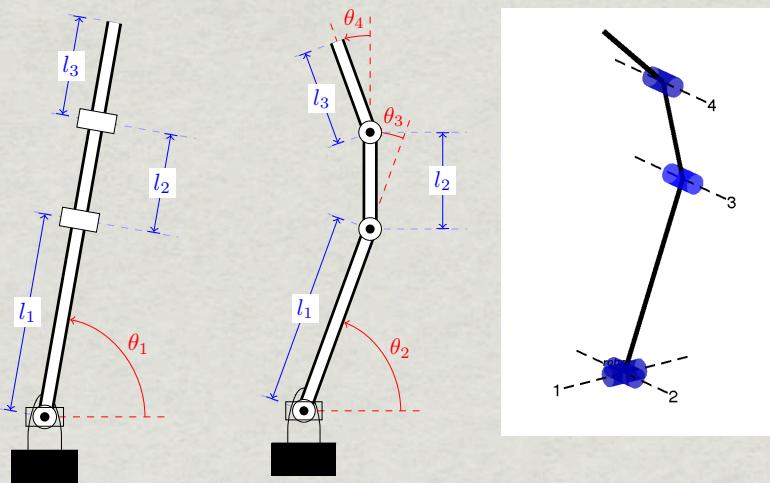
Bidirectional Antagonism with Variable Stiffness Actuation

### DLR Hand 2

### 12 DoF Hand



## Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού Δακτύλου 4DOF



$$T_i(\theta_i) = A_{\Sigma_i}^O [Rot_z(\theta_{i1}) * Rot_x(\pi/2)] [Rot_z(\theta_{i2}) * Tra_x(l_1)] \\ [Rot_z(\theta_{i3}) * Tra_x(l_2)] [Rot_z(\theta_{i4}) * Tra_x(l_3)] \quad (1)$$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} T_1(\theta_1) & 0 \\ 0 & \ddots & T_N(\theta_N) \end{bmatrix}$$

## Διαφορικό Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού Δακτύλου 4DOF

$$J_i(\theta_i) = \left[ \frac{\partial x_i}{\partial \theta_i} \left[ (R_i^T \frac{\partial R_i}{\partial \theta_i}) \times^{-1} \right] \right]$$

$$J_H(\theta) = \begin{bmatrix} J_1(\theta_1) & 0 \\ 0 & \ddots & J_N(\theta_N) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \omega \end{bmatrix} = J_H(\theta) \dot{\theta}$$

# Lagrangian Δυναμικό Μοντέλο Ρομποτικού Χεριού

Συνάρτηση Lagrange  $\longrightarrow L_i = K_i - P_i$

Κινητική Ενέργεια Συνδέσμου  $ij \longrightarrow K_{ij} = \frac{1}{2}m_{ij}\dot{x}_{cm\_ij}^T\dot{x}_{cm\_ij} + \frac{1}{2}\omega_{ij}^T I_{ij}\omega_{ij}$   $K_i = \sum_{j=1}^4 K_{ij}$

Δυναμική Ενέργεια  $\longrightarrow P_{ij} = m_{ij}gh_{ij}$   $P_i = \sum_{j=1}^4 P_{ij}$

Stationary Principle /  
Principle of least action

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_i}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L_i}{\partial \theta_i} = \tau_i$$

Δυναμικό Μοντέλο Ρομποτικού  
Χεριού

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau + \tau_{ext}$$

Δυναμικό Μοντέλο  
Δακτύλου i

$$M_i(\theta_i)\ddot{\theta}_i + C_i(\theta_i, \dot{\theta}_i)\dot{\theta}_i + g_i(\theta_i) = \tau_i + \tau_{i\_ext}$$



Ιδιότητες Δυναμικού Μοντέλου

$$M(\theta) > 0 \quad \& \quad M(\theta)^T = M(\theta)$$

$$(\dot{M} - 2C)^T = -(\dot{M} - 2C)$$

## Ρομποτικός Έλεγχος Βασιζόμενος στην Παθητικότητα

Έστω το σύστημα

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \\ f(0,0)=0, \quad h(0)=0 \end{cases} \quad \text{παθητικό αν} \quad u^T y \geq \dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} f(x, u)$$

με συνάρτηση συστώσευσης  $V(x) \geq 0$

Zero state - Observable  $\longrightarrow \dot{x} = f(x, 0) \quad x(t) = 0 \quad \{x | h(x) = 0\}$

Τότε, η  $u = -\phi(y)$  τοπικά Lipschitz  $\phi(0) = 0 \quad y^T \phi(y) > 0$

σταθεροποιεί το σύστημα στην αφετηρία του.

$$u = \tau = g(q) - \phi_p(e) - D\dot{e} \longrightarrow M(\theta)\ddot{e} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{e} + D\dot{e} + \phi_p(e) = \tau_{ext}$$

$$V = \frac{1}{2}\dot{e}^T M(\theta)\dot{e} + V_d(e) \quad V_d(e) = \int_0^e \phi_p^T(\sigma)d\sigma$$

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\dot{e}^T (\dot{M} - 2C)\dot{e} - \dot{e}^T D\dot{e} \leq 0$$

La Salle

$$\dot{V} = 0 \Rightarrow \dot{e} = 0 \Rightarrow \ddot{e} = 0 \Rightarrow \phi_p(e(t)) = 0 \Rightarrow e(t) = 0$$

## Στατική Ανάλυση Λαβής

$$\sum_{i=1}^N f_{ci}^o + f_{ext} = 0 \quad \sum_{i=1}^N (r_{ci} \times f_{ci}^o) + n_{ext} = 0$$

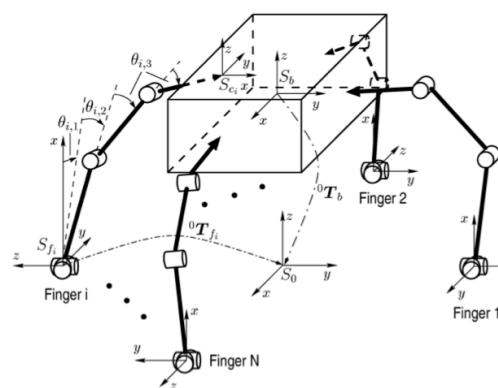
$$\underbrace{\begin{bmatrix} R_o^T & R_o^T & \dots & R_o^T \\ [r_{c1} \times] R_o^T & [r_{c2} \times] R_o^T & \dots & [r_{cN} \times] R_o^T \end{bmatrix}}_G \underbrace{\begin{bmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \\ \vdots \\ f_{cN} \end{bmatrix}}_{f_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} -f_{ext} \\ -n_{ext} \end{bmatrix}}_{F_{ext}}$$

$$F_{ext} = Gf_c \quad \dot{x} = G\dot{x}_o$$

Λύση ελαχίστων τετραγώνων

$$\min ||F_{ext} - Gf_c||$$

$$f_c = [G]^+ F_{ext} + (\mathbf{I} - [G]^+ G) \xi$$

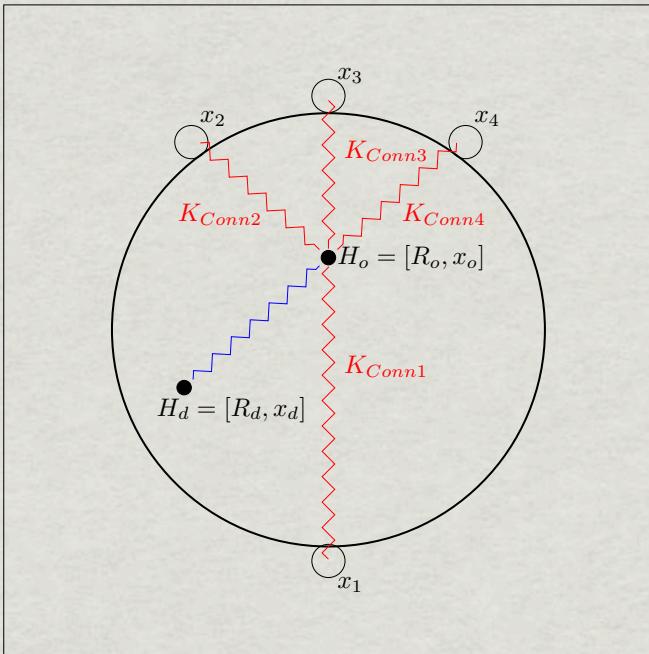


Πρακτικό πρόβλημα στη μέτρηση  
του  $F_{ext}$

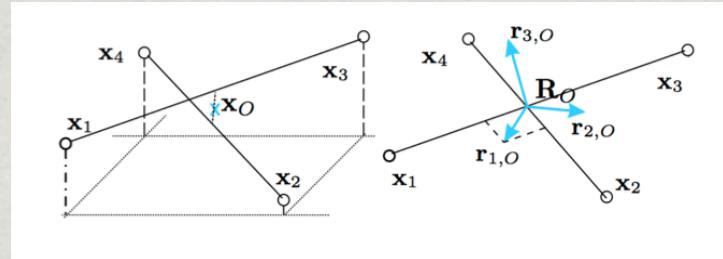
Θωρυβώδη, δύσκολα στην  
επεξεργασία σήματα

Αναζητούνται μέθοδοι  
έμμεσου ελέγχου δύναμης

# Ακαμψία στο επίπεδο του αντικειμένου - Ελεγκτής IPC



Εικονικό Πλαίσιο Αντικειμένου  $H_o = [R_o, x_o] \in SE(3)$



$$x_o(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i(\theta)}{N}$$

$$\tilde{r}_{1,o} = \frac{x_1 - x_3}{\|x_1 - x_3\|} + \frac{x_2 - x_4}{\|x_2 - x_4\|}, \quad r_{1,o} = \frac{\tilde{r}_{1,o}}{\|\tilde{r}_{1,o}\|}$$

$$\tilde{r}_{3,o} = [(x_1 - x_3) \times](x_2 - x_4), \quad r_{3,o} = \frac{\tilde{r}_{3,o}}{\|\tilde{r}_{3,o}\|}$$

$$r_{2,o} = [r_{3,o} \times] r_{1,o}$$

$$V_{o,t}(\theta) = \frac{1}{2}(x_o - x_{o,des})^T R_o K_{o,t} R_o^T (x_o - x_{o,des})$$

Νόμος Ελέγχου

$$V_{o,r}(\theta) = 2\epsilon_b^T K_{o,r} \epsilon_b$$

$$\tau = -D(\theta)\dot{\theta} - \frac{\partial V_d}{\partial \theta}(\theta) + g(\theta)$$

$$V_{Conn}(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N K_{Conn,i} [\|\Delta x_i\| - l_{i,des}]^2$$

$$V_d(\theta) = V_{o,t}(\theta) + V_{o,r}(\theta) + V_{Conn}(\theta)$$

## Ακαμψία στο επίπεδο του αντικειμένου - Ελεγκτής IPC

$$\frac{\partial V_{o,r}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,r}^T 4 J_{\omega \epsilon}^T K_{o,r} \epsilon_b \longrightarrow \text{Ακαμψία Στροφικής Μετατόπισης}$$

$$\frac{\partial V_{o,t}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,t}^T K_{o,t} R_o^T (x_o - x_{o,des}) \longrightarrow \text{Ακαμψία Μεταφορικής Μετατόπισης}$$

$$\frac{\partial V_{Conn}(\theta)}{\partial \theta} = J_{conn}^T K_{Conn} \begin{bmatrix} ||\Delta x_1|| - l_{1,des} \\ \vdots \\ ||\Delta x_N|| - l_{N,des} \end{bmatrix} \longrightarrow \text{Συνδετική Ακαμψία με το Εικονικό Πλαίσιο}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_o \\ \omega_{o,0} \\ ||\Delta \dot{x}|| \end{bmatrix}}_{\dot{\bar{x}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{o,t} \\ J_{o,r} \\ J_{conn} \end{bmatrix}}_{J_{tot}} \dot{\theta}$$

$$\ddot{\bar{x}} = J_{tot}(\theta) \ddot{\theta} + \dot{J}_{tot}(\theta) \dot{\theta}$$

## Δυναμικό Μοντέλο Λαβής Εκφρασμένο στο Εικονικό Πλαίσιο του Αντικειμένου

$$\ddot{\bar{x}} - \dot{J_{tot}}(\theta)\dot{\theta} + J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)) = J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)\tau$$

$$\ddot{\bar{x}} - \dot{J_{tot}}(\theta)\dot{\theta} + J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)) = J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(-D(\theta)\dot{\theta} - \frac{\partial V_d}{\partial \theta}(\theta) + g(\theta))$$

$$D(\theta) = J_{tot}^T D_{\bar{x}}(\theta) J_{tot}$$

$$\ddot{\bar{x}} - \dot{J_{tot}}(\theta)\dot{\theta} + J_{tot}(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}) = J_{tot}(\theta)M^{-1}J_{tot}^T(\theta)(-D_{\bar{x}}\dot{\bar{x}} - F_{\bar{x}})$$

$$F_{\bar{x}} = [f_o \ m_o \ f_{Conn}]^T = K_{\bar{x}}(\bar{x} - \bar{x}_{des}) = K_{\bar{x}}e_{\bar{x},o} \quad K_{\bar{x}} = blockdiag\{K_{o,t} \ K_{o,r} \ K_{Conn}\}$$

$$F_o = M_o[\ddot{x}_o \ \dot{\omega}_o \ O_{N \times 6}]^T$$

$$M_{H,\bar{x}}(\theta)\ddot{\bar{x}} = -D_{\bar{x}}\dot{\bar{x}} - F_{\bar{x}} - F_o \quad M_{\bar{x}}(\theta) = M_{H,\bar{x}}(\theta) + \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} \\ 0_{N \times 6} \end{bmatrix} M_o[I_{6 \times 6}, 0_{6 \times N}]$$

$$M_{\bar{x}}(\theta)\ddot{\bar{x}} = -D_{\bar{x}}\dot{\bar{x}} - F_{\bar{x}}$$

Δυναμική Σφάλματος Παρακολούθησης Τροχιάς Κλειστού Συστήματος

$$M_{\bar{x}}(\theta)\ddot{e_{\bar{x},o}} + D_{\bar{x}}\dot{e_{\bar{x},o}} - K_{\bar{x}}e_{\bar{x},o} = 0$$

# Σχεδιασμός Όρου Απόσβεσης

Μέθοδος Διπλής Διαγωνοποίησης

Πρακτικά

$$M_{\bar{x}} = QQ^T \quad M_{\bar{x},ii} >> M_{\bar{x},ij}, i \neq j$$
$$K_{\bar{x}} = QK_{d0}Q^T \quad M_{\bar{x}}(\theta) = (\text{blockdiag}\{\text{diag}\{J_{tot}M(\theta)^{-1}J_{tot}^T\}\})^{-1} +$$
$$D_{\bar{x}}(\theta) = 2Q(\theta)D_\xi K_{do}^{1/2}Q(\theta)^T \quad \begin{bmatrix} I_{6 \times 6} \\ 0_{N \times 6} \end{bmatrix} M_o [I_{6 \times 6}, 0_{6 \times N}]$$

$$w = Q^T(\theta)e_{\bar{x},o} \quad Q(\theta) = \sqrt{M_{\bar{x}}}$$

$$\ddot{w} + 2D_{\bar{x}}K_{\bar{x}}^{1/2}\dot{w} + K_{\bar{x}}w = 0$$

$$D_{\bar{x},ii}(\theta) = 2\xi_i \sqrt{M_{\bar{x},ii}(\theta)K_{\bar{x},ii}} \quad \xi_i \in [0, 1]$$

## Έλεγχος Μηδενικού Χώρου Ρομποτικού Χεριού

$$\ddot{x} - J(\theta)\dot{\theta} + J(\theta)M^{-1}(\theta)(C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)) = J(\theta)M^{-1}(\theta)\tau_d$$

$$\tau_d = \tau_{d,cart} + N(\theta)\tau_{d,N}$$

$$J(\theta)M(\theta)^{-1}N(\theta) = 0$$

$$N(\theta) = (I - J^T(\theta)\Lambda(\theta)J(\theta)M^{-1}(\theta))$$

$$\Lambda(\theta) = (J(\theta)M^{-1}(\theta)J(\theta)^T)^{-1}$$

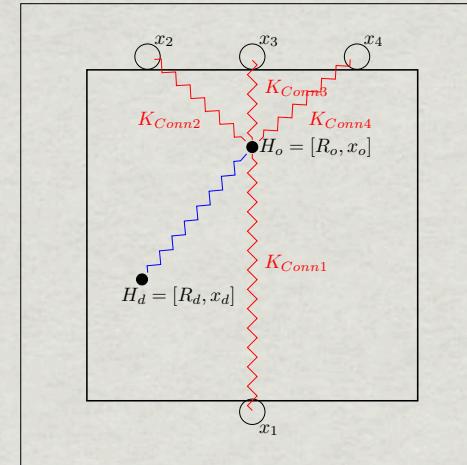
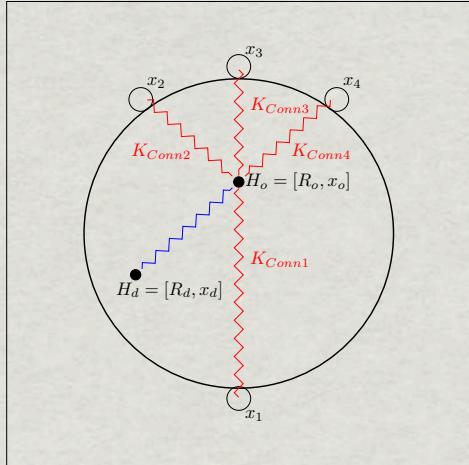
Υποεργασία Μηδενικού Χώρου Αρθρώσεων  
Σύζευξη των αρθρώσεων 3, 4 κάθε δακτύλου

$$\tau_{d,N} = -K_{Null}(\theta_{i3} - \alpha\theta_{i4}) - D_{Null}\dot{\theta} \quad \alpha \in [0, 1]$$

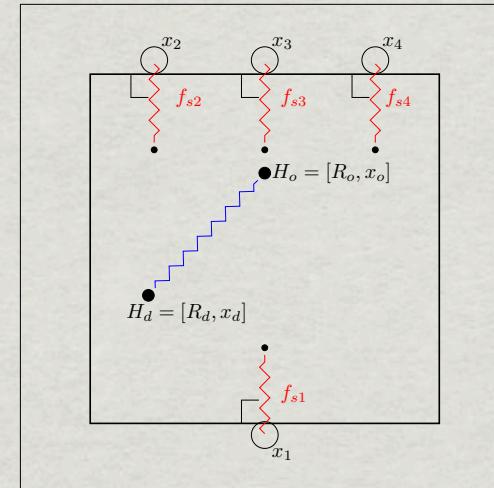
Show time!

Video!

# Επεκτάσεις Τροποποιήσεις του Ελεγκτή Εμπέδησης στο επίπεδο του αντικειμένου Εσωτερικός Χώρος Δυνάμεων



$$\frac{\partial V_{Conn}(\theta)}{\partial \theta} = J_{conn}^T K_{Conn} \begin{bmatrix} ||\Delta x_1|| - l_{1,des} \\ \vdots \\ ||\Delta x_N|| - l_{N,des} \end{bmatrix}$$



# Επεκτάσεις Τροποποιήσεις του Ελεγκτή Εμπέδησης στο επίπεδο του αντικειμένου

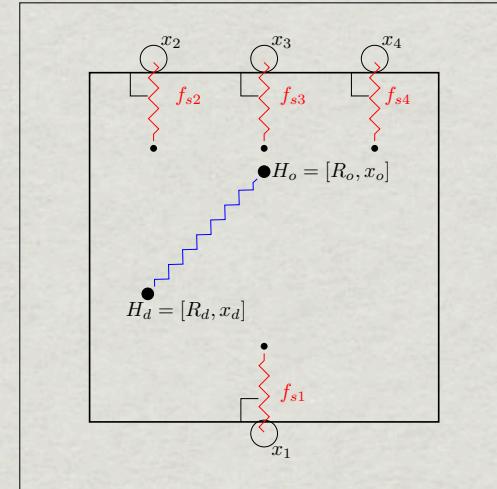
$$F_s = n f_s$$

$$\begin{bmatrix} R_o^T & R_o^T & R_o^T & R_o^T \\ [r_{c1} \times] R_o^T & [r_{c2} \times] R_o^T & [r_{c3} \times] R_o^T & [r_{cN} \times] R_o^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{s1} \\ F_{s2} \\ F_{s2} \\ F_{sN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_{ext} \\ -n_{ext} \end{bmatrix}$$

$$r_{ci} = \frac{x_i - x_o}{\|x_i - x_o\|}$$

$$f_{s, Null} = \underbrace{(\mathbf{I} - [G]^+ G)}_{G_{s, Null}} f_s$$

$$\tau_N(\theta) = J_H^T(\theta) (\mathbf{I} - [G]^+ G) f_s$$



# Επεκτάσεις Τροποποιήσεις του Ελεγκτή Εμπέδησης στο επίπεδο του αντικειμένου

## Βαρυτική Αντιστάθμιση

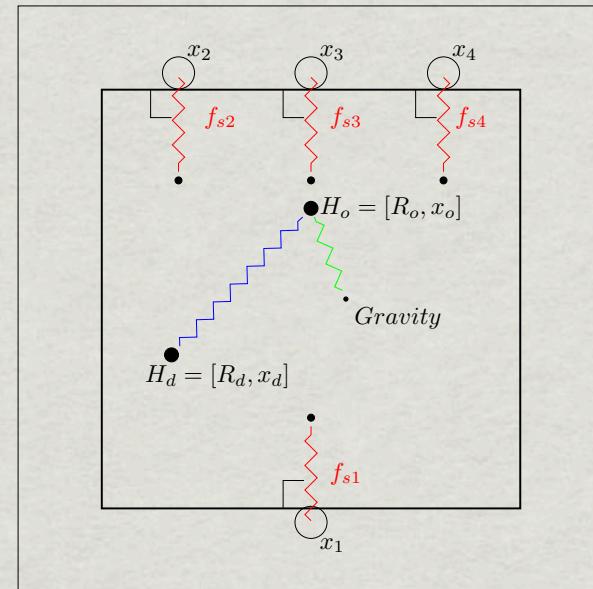
$$G = [0, 0, mg]$$

$$f_g = R_o^T G$$

$$m_{o,g} = [r_{COG} \times] R_o^T G$$

$$\frac{\partial V_{o,r}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,r}^T \underbrace{(4J_{\omega\epsilon}^T K_{o,r} \epsilon_b + m_{o,g})}_{m_o}$$

$$\frac{\partial V_{o,t}(\theta)}{\partial \theta} = J_{o,t}^T \underbrace{(K_{o,t} R_o^T (x_o - x_{o,des}) + f_{o,g})}_{f_o}$$



# Παράμετροι Συστήματος

## Open Dynamic Engine Parameters

World Time Step	656.25 $\mu sec$
ERP	0.2
CFM	$\sim 0$

## IPC, Rotational - Translational Stiffness

$$K_{o,r} = \begin{bmatrix} 700 & 0 & 0 \\ 0 & 700 & 0 \\ 0 & 0 & 700 \end{bmatrix}, \quad K_{o,t} = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \end{bmatrix}$$

$$\xi = 0.9, \quad l_{i,des} = 0.15m, \quad i = 1, 2, 3, 4$$



Dumping Parameter  $\sim$  Critical Dumping

## Null Space Controller Gains

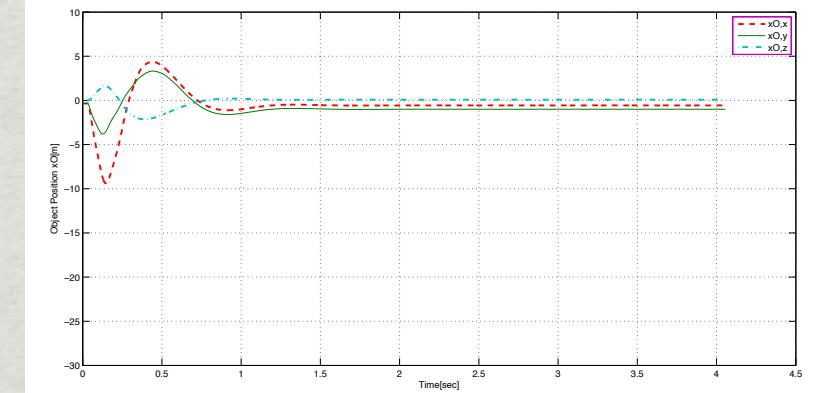
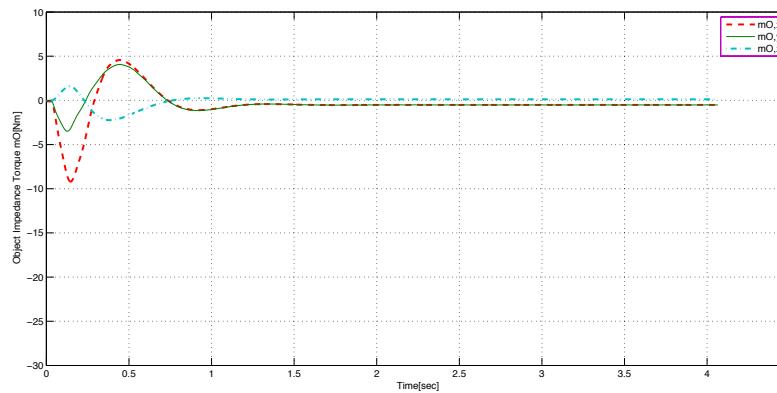
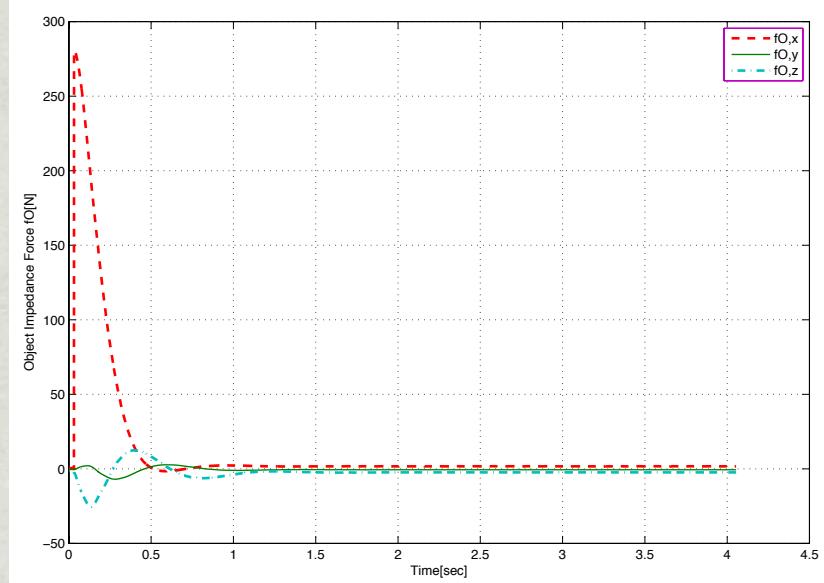
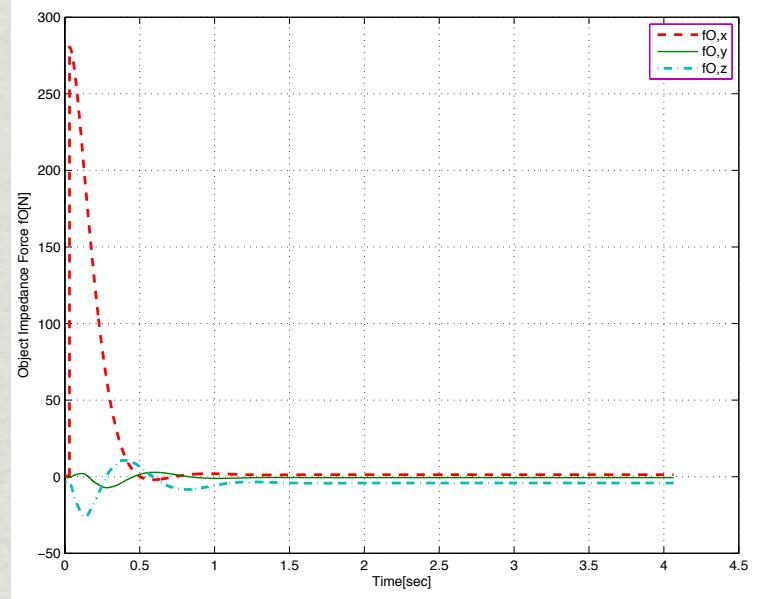
$$K_N = 50, \quad D_N = 0.13K_N^{1/2}$$

# Αποτελέσματα Βηματικών Αποκρίσεων

Μεταφορά -40cm κατά τον x άξονα

IPC

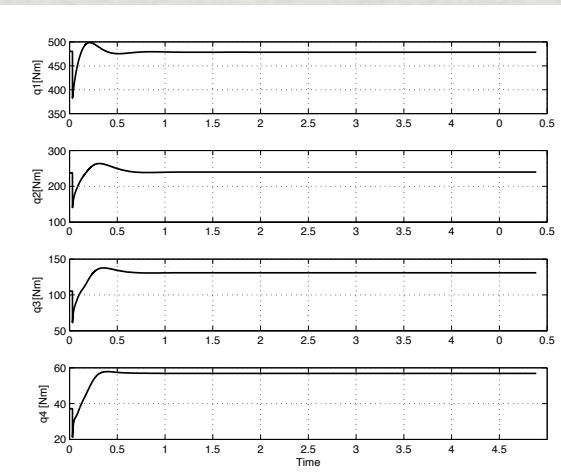
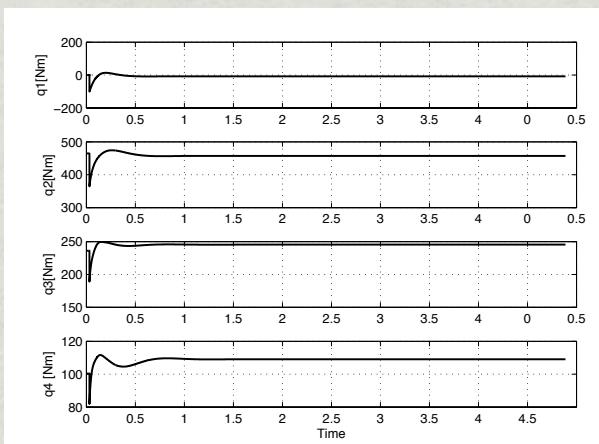
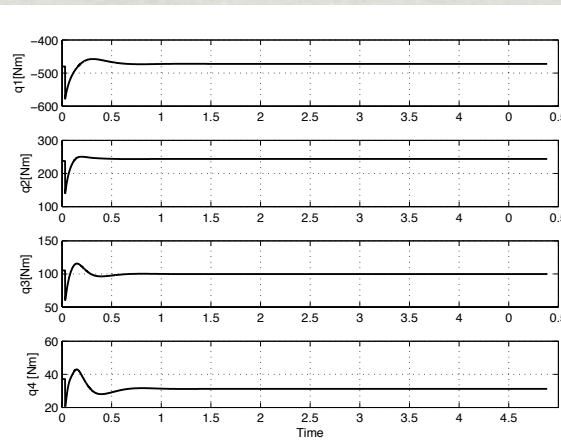
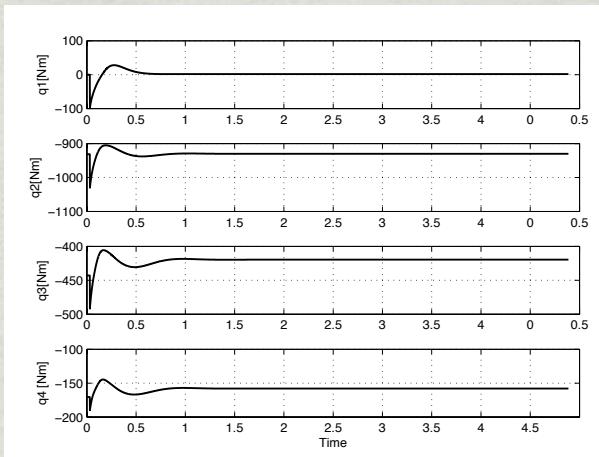
IPC-IF



# Αποτελέσματα Βηματικών Αποκρίσεων

Μεταφορά -40cm κατά τον x άξονα

Σήματα Ελέγχου στις αρθρώσεις

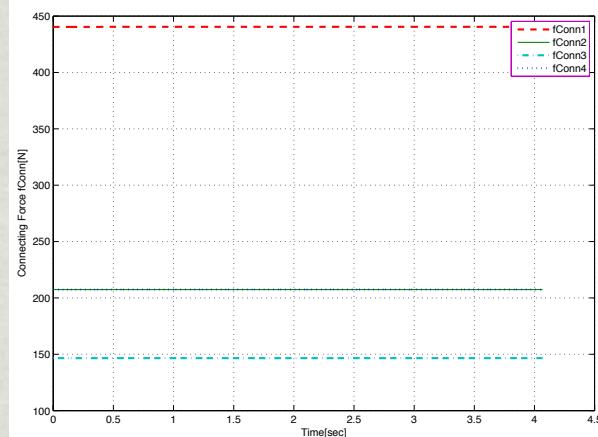


# Αποτελέσματα Βηματικών Αποκρίσεων

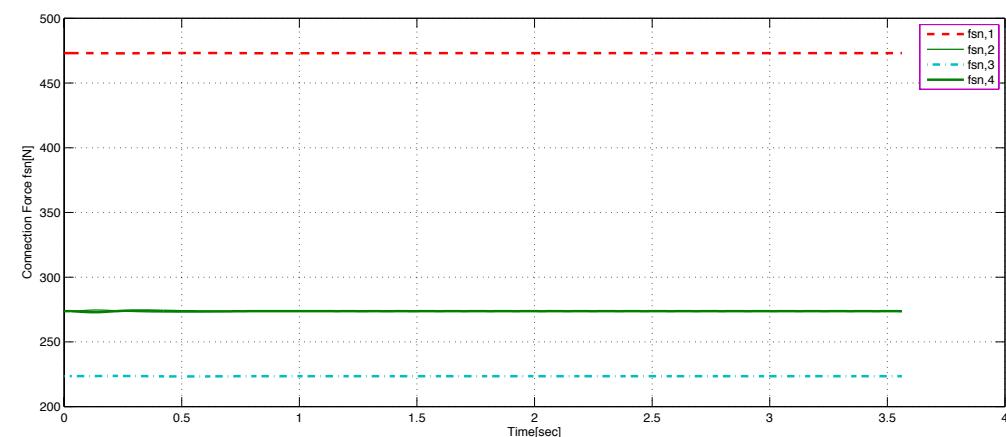
Μεταφορά -40cm κατά τον x άξονα

Εσωτερικές Δυνάμεις

IPC



IPC-IF

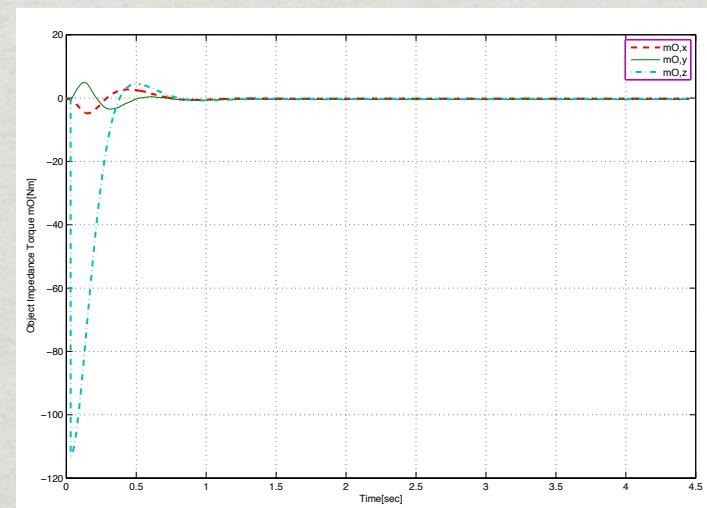
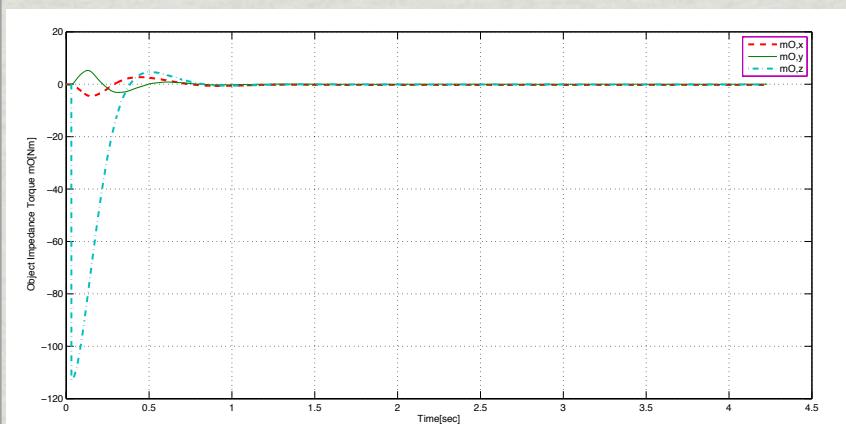
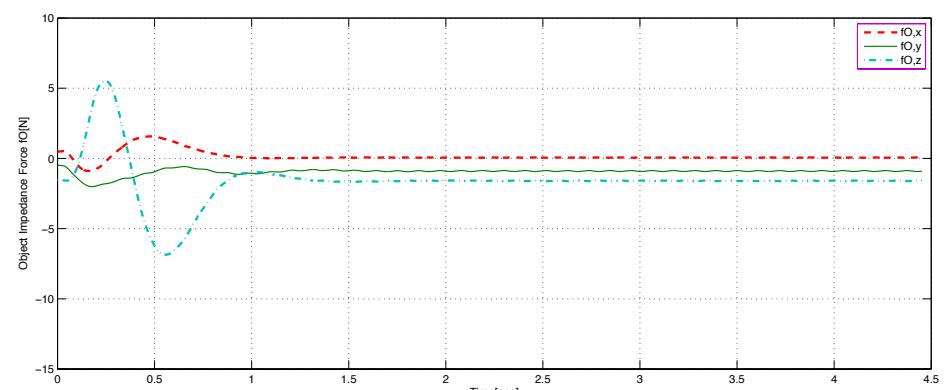
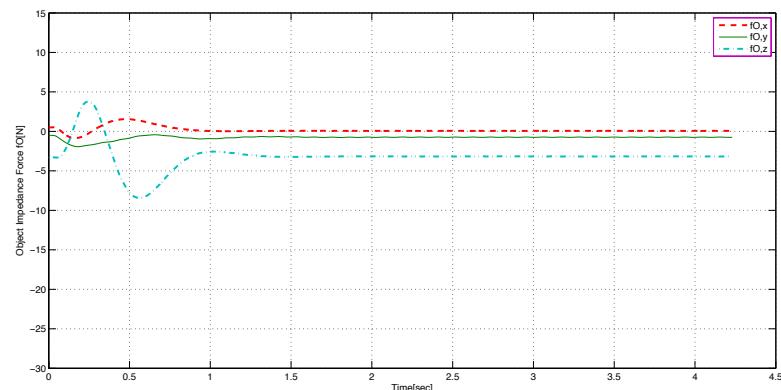


# Αποτελέσματα Βηματικών Αποκρίσεων

Στροφή 0.6rad κατά τον z άξονα

IPC

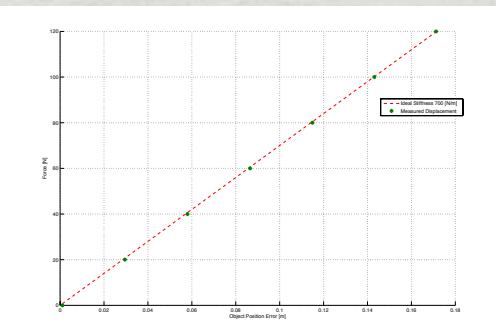
IPC-IF



# Μεταφορική Ακαμψία

IPC

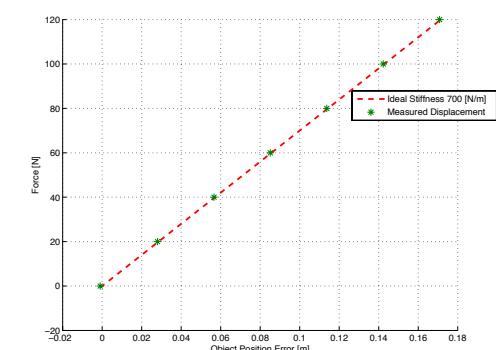
x



Mean Square Error

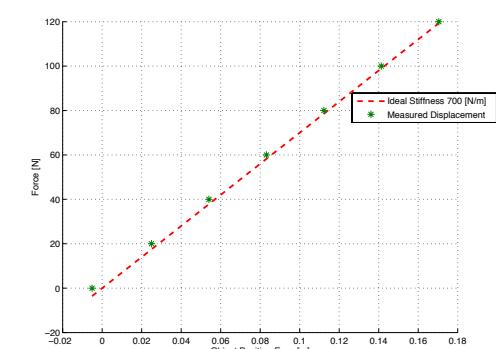
1.29

y



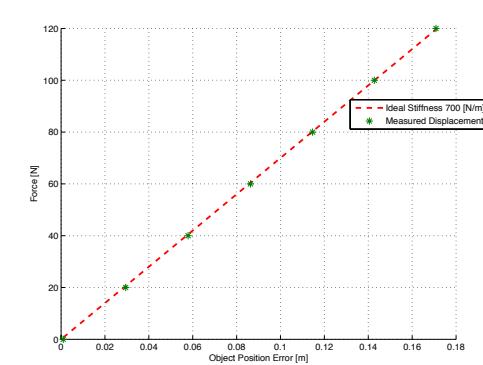
1.36

z



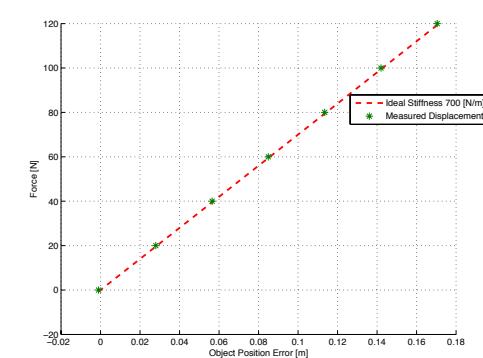
3.58

IPC-IF

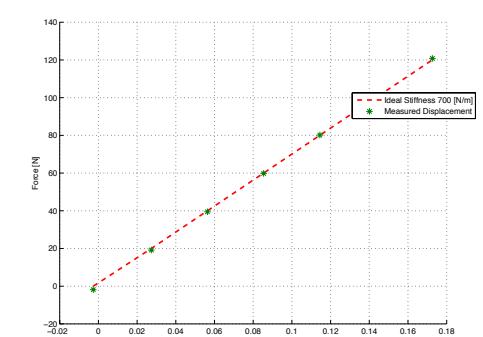


Mean Square Error

0.62



1.23

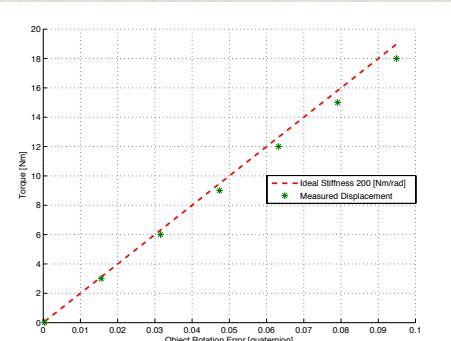


0.68

## Στροφική Ακαμψία

IPC

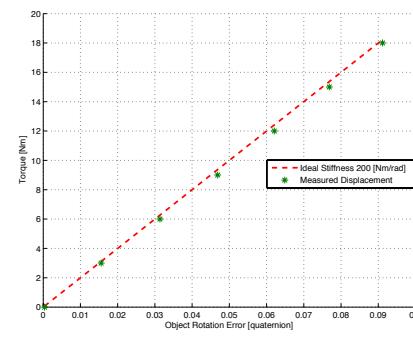
x



Mean Square Error

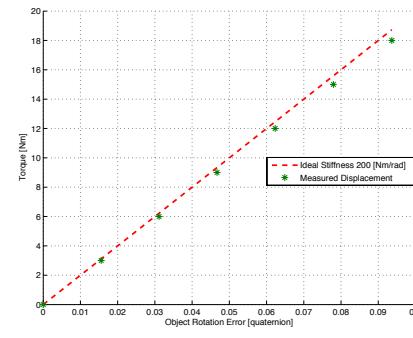
1.67

y



0.49

z

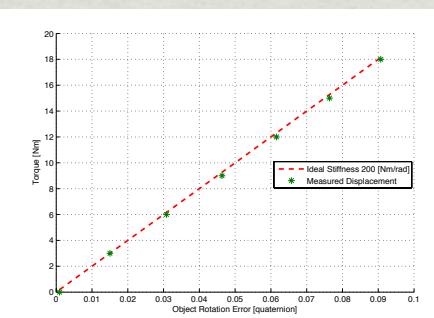
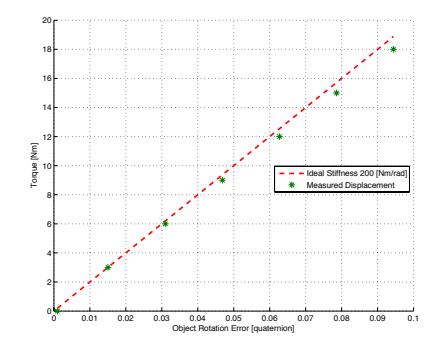


0.87

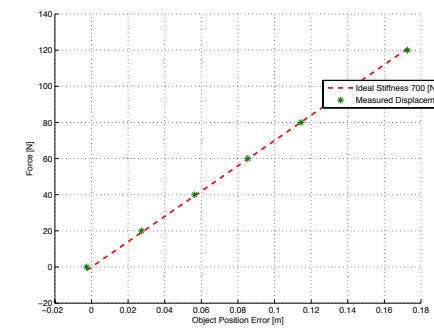
IPC-IF

Mean Square Error

1.19



0.26



0.73

## Μετρηθείσες Μήτρες Ακαμψίας

### Controller Values

$$K_{o,r} = \begin{bmatrix} 700 & 0 & 0 \\ 0 & 700 & 0 \\ 0 & 0 & 700 \end{bmatrix}, \quad K_{o,t} = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \end{bmatrix}$$

### IPC

$$K_{tr,measured} = \begin{bmatrix} 697.9 & 0 & 0 \\ 0 & 703.2 & 0 \\ 0 & 0 & 710.2 \end{bmatrix}, \quad K_{rot,measured} = \begin{bmatrix} 189 & 0 & 0 \\ 0 & 195 & 0 \\ 0 & 0 & 192 \end{bmatrix}$$

### IPC - IF

$$K_{tr,measured} = \begin{bmatrix} 699 & 0 & 0 \\ 0 & 704 & 0 \\ 0 & 0 & 698 \end{bmatrix}, \quad K_{rot,measured} = \begin{bmatrix} 191 & 0 & 0 \\ 0 & 196 & 0 \\ 0 & 0 & 192 \end{bmatrix}$$

Παραπομπές

# Τέλος

“Αναξαγόρας μεν ούν φησι δια το χείρας ἔχειν φρονιμωτάτον είναι των ζώων  
άνθρωπον εύλογον δε δια το φρονιμωτάτον είναι χείρας λαμβανειν”

Αριστοτέλης

Ερωτήσεις?