Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Σημάτων Ελέγχου και
Ρομποτικής

Έλεγχος Δυναμικής Εμπέδησης Επιδέξιας Ρομποτικής Λαβής στο Πλαίσιο του Χειριζόμενου Αντικειμένου

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνου Π. Βάσιου

Περιεχόμενα

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

Κίνητρο

Εμπέδηση - Impedance

Πέδηση

[λόγ. < μσν. πέδη(σις) `δέσμευση των ποδιών´ -ση < αρχ. ρ. πεδη- (πεδῶ) -σις > -ση]

Δυναμική του Συστήματος

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f_u + F$$

Επιθυμητή Μηχανική Εμπέδηση

$$m_d(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + b_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_d(x_d - x) = F_d - F$$

Ελεγκτής

$$f_u = mu + b\dot{x} + kx - F$$

$$u = \ddot{x}$$

$$u = \ddot{x} + m^{-1}[b_d(\dot{x}_d - \dot{x}) + k_d(x_d - x) - (F_d - F)]$$

Αποδόμηση - Προβλήματος Χειρισμού

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

Εστιάζουμε!

Επιδεξιότητα

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.

task performance
human-robot interaction
behavior-based intelligence
human presence detection with 360° sonar and front camera
user interface through the navigator on the arm and display on the face
force sensing and force control at each joint
naturally compliant through springs and force sensing at each joint. Can feel bumping into people or objects
vision-guided movement visual object identification
train objects and tasks by direct movement of the arms
on casters for movement with locking feet for stability

PR2

STBD
EXIT
TO NODE

DLR German Aerospace Center Hand

19 DoF Hand

44 intelligent motor modules

In-tendon progressive spring mechanism

Bidirectional Antagonism with Variable Stiffness Actuation

DLR Hand 2

12 DoF Hand

Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού Δακτύλου 4DOF

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

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

Διαφορικό Κινηματικό Μοντέλο Ρομποτικού

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

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

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

Lagrangian Δυναμικό Μοντέλο Ρομποτικού Χεριού

Συνάρτηση Lagrange $\longrightarrow$ $L_i = K_i - P_i$

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

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

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 $\left\langle \begin{array}{c} \dot{x} = f(x,u) \\ y = h(x) \\ \mathrm{f(0,0)=0,\quad h(0)=0} \end{array} \right\rangle$ παθητικό αν $u^T y \geq \dot{V} = \dfrac{\partial V}{\partial x} f(x,u)$

με συνάρτηση $V(x) \geq 0$

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

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

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

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

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

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

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

$$F_{ext} = G f_c \qquad \dot{x} = G \dot{x}_o$$

Λύση ελαχίστων τετραγώνων

$$min||F_{ext} - G f_c||$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Νόμος Ελέγχου

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

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

Ακαμψία στο επίπεδο του αντικειμένου - Ελεγκτής IPC

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

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

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

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

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

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

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

$$F_{\overline{x}} = [f_o \;\; m_o \;\; f_{Conn}]^T = K_{\overline{x}}(\overline{x} - \overline{x}_{des}) = K_{\overline{x}}e_{\overline{x},o}$$

$$K_{\overline{x}} = blockdiag\{K_{o,t} \;\; K_{o,r} \;\; K_{Conn}\}$$

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

$$M_{H,\overline{x}}(\theta)\ddot{\overline{x}} = -D_{\overline{x}}\dot{\overline{x}} - F_{\overline{x}} - F_o$$

$$M_{\overline{x}}(\theta) = M_{H,\overline{x}}(\theta) + \begin{bmatrix} I_{6\times 6} \\ 0_{N\times 6} \end{bmatrix} M_o[I_{6\times 6}, 0_{6\times N}]$$

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

Δυναμική Σφάλματος Παρακολούθησης Τροχιάς Κλειστού Συστήματος

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

Σχεδιασμός Όρου Απόσβεσης

Μέθοδος Διπλής Διαγωνοποίησης

$$M_{\overline{x}} = QQ^T$$

$$K_{\overline{x}} = QK_{d0}Q^T$$

$$D_{\overline{x}}(\theta) = 2Q(\theta)D_{\xi}K_{do}^{1/2}Q(\theta)^T$$

$$w = Q^T(\theta)e_{\overline{x},o}$$

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

Πρακτικά

$$M_{\overline{x},ii} >> M_{\overline{x},ij}, i \neq j$$

$$M_{\overline{x}}(\theta) = (blockdiag\{diag\{J_{tot}M(\theta)^{-1}J_{tot}^T\}\})^{-1} + \begin{bmatrix} I_{6\times6} \\ 0_{N\times6} \end{bmatrix} M_o[I_{6\times6}, 0_{6\times N}]$$

$$Q(\theta) = \sqrt{M_{\overline{x}}}$$

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

Έλεγχος Μηδενικού Χώρου Ρομποτικού Χεριού

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

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

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

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

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

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

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

Show time!

Αρχιτεκτονική Υλοποίησης Προσομοίωσης

Matlab - Simulink

- Advanced Control Design Tools
- Code Generation Flexibility
- Ready to go solutions

Open Dynamics Engine ODE

- Collision Detection
- Multi-body Dynamics
- Robust Simulation

Mex C++ S-Function Block!

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

$$F_s = n f_s$$

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

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

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

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

Επεκτάσεις Τροποποιήσεις του Ελεγκτή Εμπέδησης στο επίπεδο του αντικειμένου

Βαρυτική Αντιστάθμιση

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

$$f_g = R_o^T G$$

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

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

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

Παράμετροι Συστήματος

Open Dynamic Engine Parameters

World Time Step	656.25 μsec
ERP	0.2
CFM	~ 0

IPC, Rotational - Translational Stiffness

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

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

Dumping Parameter ~Critical Dumping

Null Space Controller Gains

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

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

Μετρήσεις Ακαμψίας

Μεταφορική Ακαμψία

	IPC	Mean Square Error		IPC-IF	Mean Square Error
x		1.29	x		0.62
y		1.36	y		1.23
z		3.58	z		0.68

Στροφική Ακαμψία

	IPC	Mean Square Error		IPC-IF	Mean Square Error
x		1.67	x		1.19
y		0.49	y		0.26
z		0.87	z		0.73

Μετρηθείσες Μήτρες Ακαμψίας

Controller Values

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

IPC

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

IPC - IF

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

Παραπομπές

[1] H. K. Khalil. Nonlinear Systems. Prentice Hall, 3rd edition, 2002.

[2] G. H. Alin Albu-Schäffer, Christian Ott. A passivity based cartesian impedance controller for flexible joint robots - part ii: Full state feedback, impedance design and experiments. In Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, volume 3, pages 2666 – 2672 Vol.3, april-1 may 2004.

[3] G. H. T. Wimboeck, C. Ott. Passivity-based object-level impedance control for a multifingered hand. In Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on, pages 4621 – 4627, oct 2006.

[4] O. K. B. Siciliano, editor. Handbook of Robotics. Springer, 2008.

[5] A. Bicchi. Hands for dexterous manipulation and robust grasping:a difficult road toward simplicity. *IEEE Trans Rob Autom,*, 16(6):652–662, December 2000.

[6] http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-3802/6102_read-8921/

[7] http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/next-big-thing-in-silicon-valley-robotics

Τέλος

"Αναξαγόρας μεν ούν φησι δια το χείρας έχειν φρονιμωτατον είναι των ζώων άνθρωπον εύλογον δε δια το φρονιμωτατον είναι χείρας λαμβανειν"

Αριστοτέλης

Ερωτήσεις