Zbornik radova 49. Konferencije za ETRAN, Budva, 5-10. juna 2005, tom IV
Proc. 49th ETRAN Conference, Budva, June 5-10, 2005, Vol. IV

PD ITERATIVNO UPRAVLJANJE UČENJEM ROBOTSKIM MANIPULATOROM SA TRI STEPENA SLOBODE

Mihailo P. Lazarević, katedra za mehaniku, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120, Beograd 35, Srbija i Crna Gora

Abstrakt –*U ovom radu predložen je algoritam iterativnog PD upravljanja učenjem (IUU) u kombinaciji sa upravljanjem u povratnoj sprezi datim robotskim objektom. Na primeru robotskog manipulatora sa tri stepena slobode sprovedena je simulacija u cilju potvrde efikasnosti predloženog algoritma upravljnja.*

1. UVOD

Najnoviji trendovi razvoja i primene robotike ukazuju sve veću direktnu kooperaciju između čoveka i robota u bliskoj budućnosti. Naročito nova oblast primene robota jeste tzv. servisna robotika (service robotics) u kojoj važno mesto zauzimaju kućni roboti ili personalni roboti sa tendencijom da postanu najzastupljeniji u svakodnevnom životu [1]. Kao takvi oni treba da imaju karakteristike slične ljudskim što se tiče sposobnosti i ponašanja, odnosno upravljanje takvim antropomorfnim robotima zasnivaće se na primeni odgovarajućih bioloških analogona [1],[2].

Upravljanje robotskim sistemom može se realizovati i na osnovu iterativnog učenja koje zauzima značajno mesto u biološkim i tehničkim sistemima [3]. Upravljanje na osnovu učenja može se primeniti na dati robotski sistem bez obzira da li isti poseduje kinematičku redundansu ili ne. Ako u izvršavanju određenih zadataka robotski sistem u dosta dugom vremenskom periodu ponavlja zadate operacije, onda postoji osnova za uvođenje i sintezu upravljanja na osnovu procesa učenja. Osnovna razlika između upravljanja učenjem od mnogih drugih postojećih upravljanja je što učenje u suštini *off-line* proces gde postoji konačno vreme između dva pokušaja. Pri tome upravljanje učenjem predstavlja kombinaciju upravljanja u direktnoj ("*feedforward*") sprezi i upravljanje u povratnoj sprezi pri čemu dominantnu ulogu predstavlja upravljanje u direktnoj sprezi i kao takvo ono ima za cilj da ostvari *predikciju* budućeg upravljanja. Predikcija je ovde posledica upamćenog znanja stečenog učenjem. Uočeno je da upravljanje u direktnoj sprezi je zastupljeno u procesu upravljanja živog organizma u prirodi. Takav mehanizam omogućava predikciju narednih pokreta organizma a koja je zasnovana korišćenjem prethodnog znanja i iskustva. Pri tome, ovde će biti razmatran i primenjen koncept *iterativnog* učenja koji je zasnovan na osobini ponovljivosti manipulacionih zadataka.

Naime, uočeno je da kod izvođenja manipulacionih zadataka koji se sastoje u ponavljanju jedne iste trajektorije, odnosno od cikličnih pokreta, primenom upravljanja na osnovu iterativnog učenja, moguće poboljšati kinematičke i dinamičke karakteristike datog sistema. Najčešće, to su brzina praćenja trajektorije i preciznost izvođenja zadate trajektorije gde se poboljšanje istih realizuje korišćenjem zadatog zakona upravljanja na osnovu iterativnog učenja. Osnovna odlika zakona upravljanja na osnovu iterativnog učenja je da u tekućoj iteraciji-pokušaju, vektor upravljanja se generiše na osnovu vektora upravljanja iz prethodne iteracije-pokušaja i informacije o grešci praćenja željene izlazne trajektorije iz prethodne iteracije. Na taj način, uči se na osnovu prethodnog pokušaja i iskustva. Neke je za uočeni sistem poznata i zadata željena trajektorija $y_d(t)$ u prostoru izlaza. Takođe, greška praćenja u i -toj iteraciji se može definisati sa:

$$e_i(t) = y_d(t) - y_i(t) \tag{1}$$

gde je sa $y_i(t)$ označen vektor izlaza uočenog sistema i $t \in [0,T]$ gde je vreme izvođenja pokreta T zadato. Zadatak je da primenom koncepta iterativnog učenja za poznatu željenu izlaznu trajektoriju $y_d(t)$, odrediti vektor upravljanja $u_i(t)$ takav da kada broj iteracija $i \to \infty$, $\lim_{i\to\infty} u_i(t) = u_z(t),\ \forall t \in [0,T]$, vektor izlaza sistema $y_i(t)$ će pratiti željenu izlaznu trajektoriju sa zadatim stepenom tačnosti, tj. $\lim_{i\to\infty} \|e_i(t)\| = \varepsilon_e$. Iterativno upravljanje učenjem je prvi razmatrao i uveo Arimoto [4], gde je razmatran jednostavan algoritam učenja D tipa u vremenskom domenu koji zahteva diferencijal signala greške $\dot{e}_i(t)$. Kasnije, drugi autori su predložili kompleksnije algoritme učenja [5],[6].

2. DINAMIKA ROBOTSKOG MANIPULATORA

Dinamika robotskog manipulatora sa n stepeni slobode, u obliku otvorenog kinematičkog lanca bez grananja gde su segmenti povezani zglobovima koji predstavljaju kinematičke parove V klase, je data u kovarijantnom obliku [7]:

$$\sum_{\alpha=1}^{n} a_{\alpha\gamma}(q)\ddot{q}^{\alpha} + \sum_{\alpha=1}^{n}\sum_{\beta=1}^{n} \Gamma_{\alpha\beta,\gamma}(q)\dot{q}^{\alpha}\dot{q}^{\beta} = Q_{\gamma}^{g} + Q_{\gamma}^{u}, \quad \gamma = 1,2,...,n \tag{2}$$

gde su $q_i, \dot{q}_i, i = 1,2,...n$ označene unutrašnje generalisane koordinate i generalisane brzine respektivno. Pri tome, vektor generalisanih sila $Q_\gamma,\ \gamma = 1,2,...,n$ sastoji se od Q_γ^g, $\left|Q_\gamma^g\right| \le h_\gamma,\ \gamma = 1,2,...,n$ koji odgovara dejstvu sile teže i, $\left|Q_\gamma^u\right| \le g_\gamma,\ \gamma = 1,2,...,n$ koji odgovara dejstvu upravljačkih sila i momenata. U kondezovanom obliku prethodni izraz se može prikazati kao:

$$\left[a(q)\right]\ddot{q} + C(q,\dot{q}) = Q^u \tag{3}$$

Dinamiku robotskog manipulatora , moguće je predstaviti u u prostoru stanja:

$$\dot{x}(t)=\begin{bmatrix} x_2(t) \\ -\left[a\left(x_1(t)\right)\right]^{-1} C(x(t)) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ \left[a\left(x_1(t)\right)\right]^{-1} \end{bmatrix} u(t) \qquad (4)$$

gde je sa $x(t)=[x_1(t), x_2(t)]=[q(t), \dot{q}(t)]^T \in R^{2n}$ označen vektor stanja, kao i $u(t)=Q^u(t) \in R^m$ vektor upravljanja. Cilj je ostvariti upravljanje tj. odrediti vektor $Q^u(t)$ tako da manipulator prati unapred zadatu trajektoriju u unutrašnjem koordinatnom sistemu kao

$$q_d(t)=\left[q_{d1}(t), q_{d2}(t), \ldots, q_{dn}(t)\right]^T,\ \forall t \in [0, T] \qquad (5)$$

Ovaj vektor je određen na višem *taktičkom* nivou planiranja trajektorije (na pr. rešavanjem inverznog zadatka kinematike).Pri tome smatraće se da nisu u potpunosti poznati matrice $[a(q)], C(q, \dot{q})$ usled nemodelovane dinamike(na primer neizvesnost po pitanju momenata inercije, koordinata težišta, itd.) Uvodi se pretpostavka da je moguće odrediti vektor $Q^g(q_d(0))$ u početnom trenutku kada se robot nalazi u referentoj konfiguraciji. Takođe, smatraće se da je robotski sistem potpuno upravljiv tj. ako i samo ako su zadovoljene sledeće nejednakosti $[3]$:

$$h_\gamma=\sup\left|Q_\gamma^g\right|<g_\gamma, \quad \gamma=1,2,\ldots,n \qquad (6)$$

Pri tome, željena vrednost vektora upravljanja $u_d(t)$ za dato $q_d(t)$ je određena sa:

$$\left[a(q_d)\right]\ddot{q}_d(t)+C(q_d, \dot{q}_d) \equiv u_d(t) \qquad (7)$$

Imajući u vidu osobenost prethodno postavljenih zahteva uvodi se PD iterativno upravljanje učenjem koji sadrži i upravljanje u povratnoj sprezi.

3. ALGORITAM PD ITERATIVNOG UPRAVLJANJA UČENJEM

U cilju primene iterativnog upravljanja koje je zasnovano na bazi učenja smatraće se da su ispunjeni uslovi koje nameće ovakva vrsta upravljanja (da je sistem kauzalan, postoji jedinstven ograničen vektor upravljanja $u_d(t)$ itd.)$[3]$. Zakon upravljanja na bazi iterativnog učenja koji je najviše zastupljen, dat je u obliku sa $[5]$:

$$u_{i+1}(t)=Lu_i(t)+K\dot{e}_i(t)+Ne_i(t) \qquad (8)$$

Suština ovakvo usvojenog zakona jeste da tekuće upravljanje se formira na osnovu prethodnog upravljanja kao i prethodne brzine promena greške praćenja kao i same greške praćenja. Ovde se uvodi modifikovani zakon upravljanja na bazi iterativnog učenja u kombinaciji sa upravljanjem u povratnoj sprezi (Sl.1).

$$u_i(t)=u_{fi}(t)+u_{fbi}(t) \qquad (9)$$

gde je upravljanje u povratnoj sprezi:

$$u_{fbi}(t)=Q\left(q_{d0}\right)-Kq_i(t)-L\dot{q}_i(t) \qquad (10)$$

gde je pretpostavljeno da je moguće odrediti vektor Q^g samo u početnom trenutku .Upravljanje u direktnoj grani je dato sa:

$$u_{fi}(t)=u_{fi-1}(t)+\Gamma\left[K(q_d-q_i)+L(\dot{q}_d-\dot{q}_i)\right], \qquad (11)$$

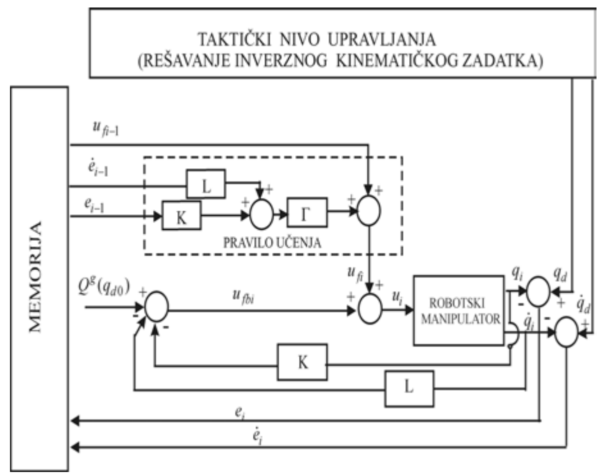
U prvoj iteraciji $i=1$ može se uzeti da je:

$$u_{f1}(t)=Kq_d(t)+L\dot{q}_d(t), \qquad (12)$$

Takođe uvodi se pretpostavka da u svakoj iteraciji važi:

$$q_i(0)=q_d(0),\ \dot{q}_i(0)=\dot{q}_d(0), \forall i \geq 1 \qquad (13)$$

Vrednost Γ pojačanja učenja mora zadovoljiti uslov $0<\Gamma \leq 1$, koji se dobija iz uslova konvergencije algoritma iterativnog učenja, (videti $[6],[8]$) i ovde će dokazivanje konvergencije biti izostavljeno.Takođe analizom u i-toj iteraciji linearizovanog vremenski promenljivog sistema duž $q_d(t),\ \forall t \in [0, T]$ može se pokazati da izborom članova dijagonalnih pozitivno definitnih matrica K, L po vrednosti budu dovoljno veliki, obezbediti stabilnost željene trajektorije.



Sl. 1 *Blok dijagram PD iterativnog upravljanja učenjem robotskim manipulatorom*

Prema tome kao što je to ranije istaknuto poznavanje matrica $[a(q)], C(q, \dot{q})$ kao i vektora $Q^g(q)$ nije neophodno što i čini interesantnim i značajnim primenu ovakve vrste upravljanja.

4. SIMULACIONI REZULTATI

Posmatra se robotski manipulator sa tri stepena slobode Sl.2 sa karakteristikama koji su dati u Tabeli 1. Koeficijenti metričkog tenzora $[a(q)]_{3\times 3}$ su određeni sledećim izrazima:

$$a_{11}=2.65+0.818 sin^2 q_2+0.241\sin^2 q_2 \sin^2 q^3+0.239\sin^2 q_2 \cos^2 q_3$$
$$a_{12}=-0.32\cos q_2+0.002\sin q_2 \sin q_3 \cos q_3$$
$$a_{13}=0.15\cos q_2$$

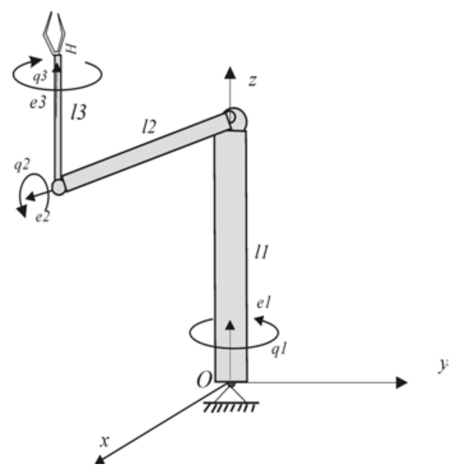
$$a_{22}=0.968+0.241\cos^2 q_3+0.239\sin^2 q_3$$
$$a_{23}=0 \qquad , \qquad (14)$$
$$a_{33}=0.15$$

Kristofelovi simboli prve vrste $\Gamma_{\alpha\beta,\gamma}$ glase:

$$
\begin{aligned}
\Gamma_{11,2} &= -0.968 sinq_2 cosq_2 - 0.091 sinq_2 cosq_2 \sin^2 q_3 - \\
&\quad - 0.089 \sin q_2 cosq_2 \cos^2 q_3, \\
\Gamma_{11,3} &= -0.002 \sin^2 q_2 \sin q_3 \cos q_3, \\
\Gamma_{12,3} &= -0.074 \sin q_2 \sin^2 q_3 - 0.076 \sin q_2 \cos^2 q_3, \\
\Gamma_{22,3} &= 0.002 \sin q_3 \cos q_3, \\
\Gamma_{22,1} &= 1.32 \sin q_2 + 0.002 \cos q_2 \sin q_3 \cos q_3 \\
\Gamma_{23,1} &= -0.074 \sin q_2 \cos^2 q_3 - 0.076 \sin q_2 \sin^2 q_3, \\
\Gamma_{33,1} &= 0, \\
\Gamma_{33,2} &= 0.
\end{aligned} \tag{15}
$$

kao i:

$$Q_1^g = 0, \; Q_3^g = 0, \; Q_2^g = 21.582 \sin q_2. \tag{16}$$



Sl.2 *Robotski manipulator sa 3 stepena slobode u referentnom položaju*

Tabela 1

seg-ment	1	2	3
m[kg]	2	5	3
L [m]	0.8	0.6	0.6
$I_c\left[kgm^2\right]$	$\begin{bmatrix} 0.279 & 0 & 0 \\ 0 & 0.279 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.241 & 0 & 0 \\ 0 & 0.239 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.241 & 0 & 0 \\ 0 & 0.239 & 0 \\ 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix}$

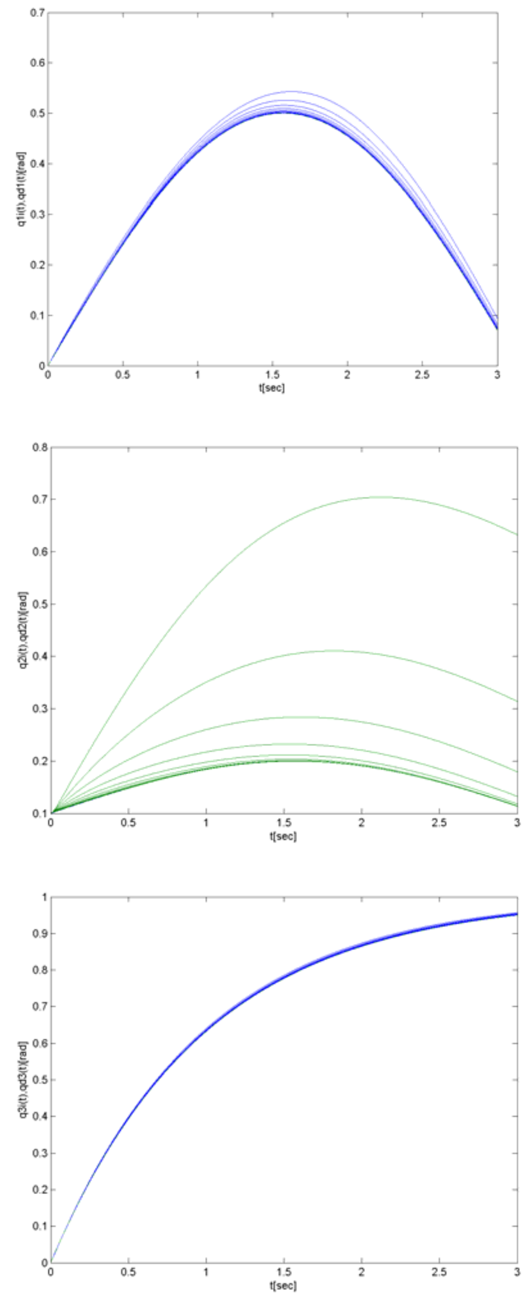
Željene trajektorije u prostoru unutrašnjih koordinata su date sa:

$$
\begin{aligned}
q_{d1}(t) &= 0.5 \sin t, \qquad \forall t \in [0,3] \\
q_{d2}(t) &= 0.1 \sin t + 0.1, \\
q_{d3}(t) &= 1 - e^{-t}.
\end{aligned} \tag{17}
$$

Za matrice K, L su usvojene sledeće vrednosti:

$$K = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix}, \; L = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \tag{18}$$

odnosno za $0 < \Gamma \leq 1$ je usvojena vrednost $\Gamma = 0.6$.



Sl.3 *Trajektorije* $q_{ki}(t),\; k = 1,2,3,\; i = 1 \rightarrow 8$ *i željene trajektorije* $q_{dk}(t),\; k = 1,2,3$

5. ZAKLJUČAK

Pokazuje se da je moguće ostvariti upravljanje datim robotskim manipulatorom sa tri stepena slobode primenom iterativnog upravljanja u kombinaciji sa upravljanjem u povratnoj sprezi. Dostizanje, u okviru propisane tačnosti , željenih trajektorija je ostvarena posle osam iteracija. Pri tome najveće odstupanje je uočeno za $q_2 \rightarrow q_{d2}$ u prvoj iteraciji jer je $Q_2^g \neq 0$, u opštem slučaju i kao takvo najviše uticalo da do toga dođe za razliku od $Q_1^g = 0$, $Q_3^g = 0$. To je omogućilo s druge strane da se jasno uoči konvergencija trajektorije $q_2(t)$ ka željenoj trajektoriji $q_{d2}(t)$,Sl.3.

LITERATURA

[1] V. Potkonjak, M. Lazarević et. al., "Human-like behavior of robot arms: general considerations and the handwriting task- Part II: the robot arm in handwriting", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing 17 (2001) 317-327*

[2] M. Lazarević, "Mathematical modeling and control of redundant robotic manipulators using biological analog", *Facta Universitatis, Series:Mechanics, Autoimatic, Control and Robotics,*,Vol 3, No 11,2001, pp.285-294.

[3] Lazarević M, "Prilog matematičkom modeliranju i upravljanju redundantnim sistemima",doktorska disertacija, *Mašinski fakultet, Beograd,*1999.

[4] S. Arimoto et.al,1984. "Bettering operation of robots by learning," *Journal. of Robotic Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 123-140, 1984.

[5] BienZ., Huh K. 1989, "High-order iterative learnig control algorithm", *IEE Proc. Part.-D*, 136 (3), pp.105-112, 1989.

[6] Lee H, Bien Z., 1996, "Study on robustness of iterative learning control with non-zero initial error," *Int. J. of Control,* vol. 64, no. 3, pp. 345-359, 1996.

[7] Lazarević P. M., "Optimalno upravljanje redundantnim robotskim sistemom: kinematički pristup",ETRAN, Herceg Novi,Jun 6-13,2003,Zbornik radova XLVII Konf. za ETRAN, pp. 359-362.

[8] Lazarević M,*" Natural" Iterative Learning Control for Uncertain LTV Dynamic System"*,ICEST "XXXVII Internacional Scientific Conference on Information, Communication and Energy and Technologies,Niš, October,2-4,2002,pp.353-356

Abstract- In this paper it is suggested applying PD iterative learning feedback control (ILC) of robotic manipulator. Using suitable example of robotic manipulator with three DOF it is presented a simulation in proving of efficiency of proposed algorithm of ILC.

PD ITERATIVE LEARNING CONTROL OF ROBOTIC MANIPULATORS WITH THREE DEGREES OF FREEDOM

Mihailo Lazarević