

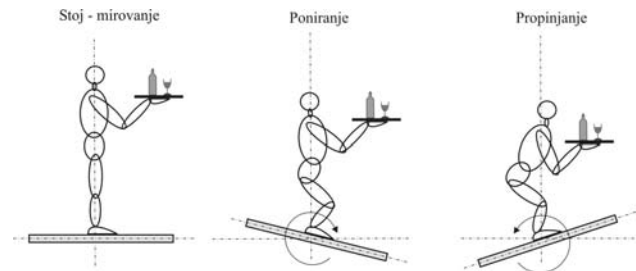
## UPRAVLJANJE DINAMIČKOM RAVNOTEŽOM I POLOŽAJEM TRUPA-POZOM HUMANOIDNIH ROBOTA U SERVISNIM ZADACIMA

Aleksandar Rodić, Duško Katić, Mirjana Filipović  
Institut Mihajlo Pupin – Beograd, Laboratorija za robotiku

**Sadržaj** – U radu se razmatraju problemi upravljanja dinamičkom ravnotežom i pozom dvonožnih lokomocionih mehanizama primenjenih u specifičnim servisnim zadacima. Pri tom, pod pozom robota se podrazumeva relativni položaj gornjeg dela trupa s ramenim pojasom u odnosu na horizontalnu površ uzetu kao referentna ravan. U radu je predložena odgovarajuća upravljačka šema koja obezbeđuje dinamičku ravnotežu mehanizma na antropomorfan način, poštujući odgovarajuće prirodne principe ponašanja biološkog sistema – čoveka. Upravljačka šema je sintetizovana korišćenjem centralizovanog dinamičkog modela mehanizma s primenom dve povratne sprege: (i) sprege po veličinama stanja (pozicijama i brzinama u zglobovima mehanizma) i (ii) sprege po dinamičkim reakcijama podloge u Tački nula momenta. Efikasnost projektovane upravljačke šeme testirana je na više simulacionih eksperimenata, takošto je robot izabrane strukture postavljen na pokretnu platformu Stewart-ovog tipa.

### 1. UVOD

Humanoidni roboti predstavljaju složene dinamičke sisteme projektovane da obavljaju različite operacije i servisne zadatke koje im postavi čovek [1,2]. Po svojoj člankovitoj strukturi podsećaju na ljudski organizam i projektovani su da obavljaju zadatke koji su delikatni za čoveka ali zahtevaju ljudsku spretnost i inteligenciju. Iz tog razloga, projektovano upravljanje ovim složenim mehanizmima uzima u obzir tehničke specifičnosti sistema ali služi da zadovolji izvesne prirodne principe kretanja i manipulacije koji su prepoznatljivi kod čoveka kao biološkog uzora. Pre svega, od lokomocionih mehanizama se zahteva ostvarivanje dinamičke ravnoteže u toku kretanja odn. u toku radne operacije. U tom cilju, pri sintezi upravljanja važnu ulogu igra tzv. Tačka nula momenta (TNM). Ova tačka predstavlja matematički pokazatelj ostvarivanja dinamičke ravnoteže [3]. Drugi zahtev koji se postavlja pred humanoidne robote, u zavisnosti od zadatka koji obavljaju, je obezbeđivanje uslova da mehanizam zauzme željenu pozu tj. relativni položaj u odnosu na referentnu površ u radnom prostoru zadatka. Ovaj položaj se najčešće definiše u odnosu na horizontalnu površinu oslonca ili u odnosu na zamišljenu horizontalnu ravan, ukoliko je oslonačka površina mehanizma nagnuta u odnosu na horizontalu. Treći zahtev odnosi se na mehanizam ostvarivanja željenih dejstava interakcije s okolinom, odn. način ostvarivanja kontaktne sile i momenta usled dodira stopala robota s podlogom ili usled interakcije mehanizma (rukom-hvataljkom) i prepreka u Operacionom prostoru zadatka. Ovaj treći zahtev, pri sintezi upravljanja iako veoma bitan za dinamiku i stabilnost mehanizma, neće biti razmatran u okviru ovog rada. Da bi se fokusirao upravljački problem koji će se razmatrati u radu na prva dva zahteva od navedenih, analiziraće se karakterističan primer robotskog servisnog zadatka prikazan na Sl. 1.



Sl. 1. Jedan karakterističan servisni zadatak humanoida

Posmatranjem primera na Sl. 1 može se definisati upravljački zadatak kojeg razmatramo u ovom radu. Pri dejstvu poremećaja, usled kretanja platforme kao oslonca stopala, zahteva se obezbeđivanje dinamičke ravnoteže mehanizma (stabilan stoj) koji obavlja prikazani servisni zadatak. Istovremeno, od robota se očekuje da zauzme takav položaj tela u radnom prostoru zadatka tako da izvršni organ (u ovom slučaju ruke s šakama/hvataljkama) obavlja postavljeni zadatak na zadovoljavajući način. U ovom primeru, robot treba da drži jedan poslužavnik s odgovarajućim sudovima napunjenim tečnošću u horizontalnom položaju. Da bi zadatak bio još složeniji od robota se zahteva da tu operaciju vrši stojeći samo na jednoj nozi dok je druga recimo podignuta iznad ravni oslonca. Ovaj složen "akrobatski" zadatak zahteva od čoveka izuzetnu spretnost, koncentraciju i okretnost dok kod robota kontroler treba da ima odgovarajuću brzinu, robustnost na poremećaje i mogućnost dinamičkih kompenzacija u realnom vremenu. U izlaganju koje sledi, biće ukratko izložena struktura upravljanja i predloženi upravljački algoritmi koji obezbeđuju željene performanse sistema.

### 2. DINAMIČKI MODEL SISTEMA

Za potrebe sinteze dinamičkog algoritma upravljanja i simulacije sistema u zatvorenoj sprezi korišćen je matematički model sistema robot-platforma. Usvojen je model platforme Stewart-ovog tipa koja je modelirana kao kruto telo oblika kvadra odgovarajućih geometrijskih i dinamičkih karakteristika [5]. Platforma se kreće u prostoru s jedne strane opterećena silama i momentima kojima robot preko stopala dejstvuje na nju. S druge strane, na platformu u tačkama "kačenja" deluju pogonske sile hidrauličkih cilindara [5] koje menjaju položaj i orijentaciju iste dajući joj prostorno kretanje u 6 koordinatnih pravaca: uzdužnom  $x$ , bočnom  $y$ , vertikalnom  $z$  i pravcima valjanja  $\varphi$ , propinjanja  $\theta$  i skretanja  $\varepsilon$ . Vektor koji opisuje to kretanje izražava se na sledeći način:

$$\underline{x} = [x \ y \ z \ \varphi \ \theta \ \varepsilon]^T \quad (1)$$

Dinamički model robotskog sistema postavljenog na pokretnu platformu može se izraziti sledećom vektorskom diferencijalnom jednačinom kretanja:

$$\hat{P} + \hat{J}^T(q, d) \cdot F = \hat{H}(q, \underline{x}, d) \ddot{q} + \hat{h}(q, \underline{x}, \dot{q}, \dot{\underline{x}}, \ddot{\underline{x}}, d) \quad (2)$$

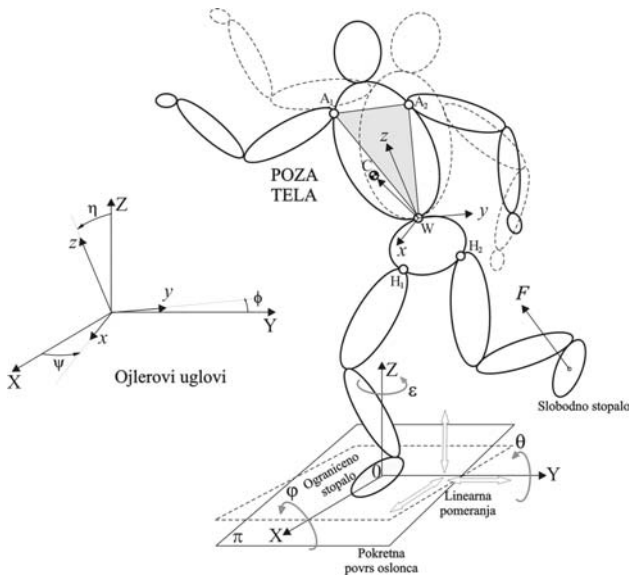
U relaciji (2) korišćene su sledeće oznake:  $q \in R^{n \times 1}$  je vektor položaja zglobova robota;  $P \in R^{n \times 1}$  je vektor pogonskih momenata u zglobovima mehanizma;  $F \in R^{6 \times 1}$  je vektor spoljašnjih sila i momenata koji dejstvuju na sistem u pojedinim tackama mehanizma;  $H \in R^{n \times n}$  je kvadratna matrica inercije mehanizma;  $h \in R^{n \times 1}$  je vektor gravitacionih, centrifugalnih i Koriolisvih sila koje dejstvuju u  $n$  zglobova mehanizma;  $J \in R^{6 \times n}$  je odgovarajuća Jakobijeva matrica sistema;  $n$  je red sistema, tj. broj stepeni slobode kretanja mehanizma;  $d \in R^{6 \times 1}$  je vektor kinematskih i dinamičkih parametara sistema.

U radu su usvojeni DC motori kao pogonske jedinice mehanizma. Njihov model i parametri su uzeti iz [3].

Za potrebe određivanja nominalnih položaja zglobova mehanizma  $q_0^*$  usled promena položaja ravni oslonca (Sl. 1) definisan je kinematski model mehanizma. On predstavlja nelinearnu trigonometrijsku, vektorsku oblika [3]:

$$\underline{X} = f(q) \quad (3)$$

gde su:  $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$ ,  $q \in R^{n \times 1}$  vektor položaja zglobova mehanizma;  $\underline{X} = [\underline{X}_1 \ \underline{X}_2 \ \dots \ \underline{X}_n]$ ,  $\underline{X} \in R^{n \times 6}$  je vektor pozicija centara zglobova i Ojlerovih uglova orijentacije  $\underline{X}_j = [X_j \ Y_j \ Z_j \ \phi_j \ \eta_j \ \psi_j]$ ,  $j = 1, \dots, 6$  segmenata mehanizma određenih u nepokretnom, Dekartovom koordinatnom sistemu  $OXYZ$  (Sl. 2).



Sl.2. Mehanizam robota i Ojlerovi uglovi orijentacije trupa

Na bazi primene modela (1)-(3) razvijen je dinamički algoritam upravljanja robotskim sistemom koji će u kratkim crtama biti opisan u sledećem odeljku rada.

### 3. SINTEZA UPRAVLJANJA

Upravljanje treba da zadovolji sledeće kriterijume: (i) tačnost ostvarivanja željenih pozicija zglobova mehanizma, (ii) održanje stanja dinamičke ravnoteže, (iii) minimizaciju odstupanja poze gornjeg dela trupa mehanizma od željenog

stanja i (iv) ostvarivanje antropomornog ponašanja mehanizma po uzoru na ljudsko biće. Kretanje fizički zdravog čoveka predstavlja izbalansiran i harmonični skup kretanja sa minimalnim pomeranjima centara masa pojedinih segmenta oko zamišljenih pozicija koje odgovaraju ljudskom položaju u stanju mirovanja (Sl. 1). Da bi se sintetizovao kontroler koji obezbeđuje jedno takvo ponašanje robota potrebno je da u svojoj strukturi poseduje dve povratne sprege: (i) spregu po veličinama stanja i (ii) spregu po dinamičkim reakcijama podloge u TNM. To povlači potrebu da se sintetizuju dva upravljačka modula koja treba da rade sinhronizovano. To su: (i) kontroler ostvarivanja trajektorije i (ii) kompenzator dinamičkih reakcija podloge. Prvo navedeni kontroler predstavlja PD-regulator čiji je algoritam definisan primenom "Computing torque" metoda. Ovaj algoritam se imajući u vidu model (2) izražava na sledeći način:

$$\hat{P}_1 = \hat{H}(q, \underline{x}, \hat{d}) \cdot [\ddot{q}_0^* + K_v(\dot{q} - \dot{q}_0^*) + K_p(q - q_0^*)] + \hat{h}(q, \underline{x}, \dot{q}, \dot{\underline{x}}, \ddot{\underline{x}}, \hat{d}) - \hat{J}^T(q, \hat{d})F. \quad (4)$$

gde matrice i vektori s znakom "hat" predstavljaju estimacije odgovarajućih veličina;  $K_p$  i  $K_v$  su matrice upravljačkih pojačanja - pozicionog i brzinskog;  $\dot{q}$  i  $\ddot{q}$  su derivativi stvarnih položaja zglobova mehanizma;  $q_0^* \in R^{n \times 1}$  je vektor on-line preračunatih nominalnih pozicija zglobova. Kao što je napred već napomenuto, preračunavanje nominalnih pozicija zglobova  $q_0 \rightarrow q_0^*$  se vrši u realnom vremenu radi prilagođavanja mehanizma novom stanju odn. položaju oslonačke ravni. Na taj način se pomaže kompenzatoru dinamičkih reakcija podloge kome bi trebalo mnogo više "napora" da izvrši kompenzovanje sila i momenata nastalih dodatno na oslonačkom stopalu robota usled pomeranja tla oslonca. Tu ulogu u znatnoj meri (ali ne u potpunosti) sada preuzima "kontroler poze" dok kompenzator dinamičkih reakcija vrši tzv. finu korekciju ravnoteže. Pod tim se podrazumeva održavanje pozicije TNM unutar oslonačkog poligona robota [3,4]. Na ovaj način, pravilnim izborom algoritma upravljanja pozom trupa i dobrim izborom upravljačkih pojačanja se u potpunosti popravljaju dinamičke karakteristike robotskog sistema i postiže njegovo antropomorfno ponašanje. Antropomorfnost pokreta se ogleda u činjenici da se sinhronizovanom promenom uglova zglobova nogu (gležnja, kolena, kuka) mehanizam prilagođava nagibu oslonca čime se umanjuje opasnost od prevrtanja tj. gubitka ravnoteže.

Način preračunavanja nominalnih pozicija zglobova koji je od velike važnosti za implementaciju predloženog algoritma (4) biće u kratkim crtama objašnjen u nekoliko sledećih redova. Položaj trupa se kod humanoidnih robota uobičajeno izražava u tzv. Dekartovom prostoru spoljašnjih koordinata ili tzv. Operacionom prostoru zadatka pomoću Ojlerovih uglova [3]. Ojlerovi uglovi trupa, za mehanizam prikazan na Sl. 2, se određuju uz pomoć geometrijskih figura prikazanih na toj slici. U tom cilju koriste se trouglovi  $\Delta WA_2A_1$  i  $\Delta H_1H_2W$ . Pošto je svaka ravan određena sa tri pripadajuće tačke, to pomenuti uglovi određuju međusobne relativne položaje grudnog i karličnog segmenta trupa u Dekartovom koordinatnom sistemu robota

0XYZ (Sl. 2). Korišćenjem kinematskog modela mehanizma (3) moguće je odrediti koordinate  $H_1, H_2, W, A_1, A_2$  centara zglobova. Ove tačke definišu odgovarajuće vektore položaja koji nam omogućavaju da sračunamo Ojlerove uglove orijentacije grudnog i karličnog segmenta. To su vektori  $\vec{h}_1, \vec{n}_1, \vec{s}_1$  i  $\vec{h}_2, \vec{n}_2, \vec{s}_2$  s napadnom tačkom u centru zgloba struka  $W$ .  $\vec{h}_1, \vec{h}_2$  predstavljaju jedinične vektore s početkom u temenu  $W$  i smerom ka naspramnim stranicama trouglova  $\Delta H_1 H_2 W$  i  $\Delta W A_2 A_1$  a leže na dužima koje predstavljaju visine ovih jednakostraničnih trouglova. Vektori  $\vec{n}_1, \vec{n}_2$  predstavljaju jedinične vektore normala iz temena  $W$  na ramatranu karlični i grudni trougao. Vektori  $\vec{s}_1, \vec{s}_2$  se određuju iz vektorskih proizvoda  $\vec{s}_1 = \vec{h}_1 \times \vec{n}_1$  i  $\vec{s}_2 = \vec{h}_2 \times \vec{n}_2$ . Predstavljani vektori su dimenzija  $3 \times 1$ . Na Sl. 2 se vektori  $\vec{h}_2, \vec{n}_2, \vec{s}_2$  poklapaju s pravicima koordinatnih osa  $0z, 0x, 0y$ . Uočeni vektori zahvataju određene uglove u odnosu na ose nepkretnog koordinatnog sistema vezanog za referentnu horizontalnu ravan  $\pi$  (Sl. 2). Najčešće se ti uglovi definišu Ojlerovim uglovima orijentacije kao Aero-dinamički uglovi valjanja  $\phi_j$ , propinjanja  $\eta_j$  i skretanja  $\psi_j$ . Indeks ( $j = 1$ ) upotrebljen je za karlični segment dok je indeks ( $j = 2$ ) upotrebljen za grudni segment. Niz od tri sukcesivne rotacije za vrednosti odgovarajućih Aero-ojlerovih uglova valjanja  $\phi_2$ , propinjanja  $\eta_2$  i skretanja  $\psi_2$  dovodi do poklapanja referentnog koordinatnog sistema 0XYZ sa lokalnim koordinatnim sistemom 0xyz sa čijim osama su kolinarni jedinični vektori položaja  $\vec{h}_2, \vec{n}_2, \vec{s}_2$ . Između vektora  $\vec{h}_2, \vec{n}_2, \vec{s}_2$  i uglova  $\phi_2, \eta_2, \psi_2$  postoji korelacija koja se može izraziti odgovarajućom matricom transformacije  $T_2 \in R^{3 \times 3}$ . Na istovetan način se uspostavlja korelacija između vektora  $\vec{h}_1, \vec{n}_1, \vec{s}_1$  i uglova  $\phi_1, \eta_1, \psi_1$ . Matrice transformacija  $T_1$  i  $T_2$  imaju oblik dat u [6]. Na bazi korišćenja elemenata matrica transformacije određuju se vrednosti traženih Aero-ojlerovih uglova. Konačno, novodobijene, redefinisane, nominalne vrednosti uglova valjanja, propinjanja i skretanja u struku se određuju iz relacija:

$$\begin{aligned} q_0^*(I) &= \psi_2 - \psi_1, \\ q_0^*(II) &= \eta_2 - \eta_1, \\ q_0^*(III) &= \phi_2 - \phi_1. \end{aligned} \quad (5)$$

gde ugao  $q_0^*(I)$  definiše torziju trupa robota,  $q_0^*(II)$  propinjanje grudnog segmenta robota oko ose koja prolazi kroz centar zgloba struka  $W$  i  $q_0^*(III)$  određuje nominalni ugao valjanja gornjeg dela trupa oko ose valjanja koja takođe prolazi kroz centar  $W$  (Sl. 2).

Pri redefinisavanju nominalnih pozicija zglobova nogu humanoidnog robota kada se pomera platforma, uglovi u zglobovima gležnja, kolena i kuka se određuju na način koji je blizak prirodnim principima koji važe za "čovekoliko"

ponašanje. Vođeni tim principom, u radu je primenjen metod najmanjeg kvadrata odstupanja položaja centara pomenutih zglobova nogu od njihovih ravnotežnih položaja. Ravnotežni položaji su određeni stanjem kada lokomocioni mehanizam miruje, uspravljen na idealno horizontalnoj ravni. Tada centri zglobova kuka, gležnja i struka leže približno na istoj osi koja je upravna na referentnu horizontalnu ravan. Usvajanjem ovog kriterijuma i primenom navedene metode najmanjih kvadrata odstupanja položaja centara pomenutih zglobova od odgovarajućih referentnih tačaka na pomenutoj osi, redefinisani su nominalni položaji u zglobovima nogu.

Kompenzator dinamičkih reakcija podloge u TNM predstavlja PI-regulator koji u svom sastavu ima povratnu spregu po momentima opterećenja na osloničkom stopalu. Ovi momenti deluju oko uzdužne i poprečne ose koje prolaze kroz TNM. Algoritam upravljanja po dinamičkim reakcijama podloge se definiše u sledećem obliku:

$$\begin{aligned} P_{dr} &= M_0^{(zmp)} + \int_0^T Q(\Delta M^{(zmp)}) dt \\ \Delta M^{(zmp)} &= M^{(zmp)} - M_0^{(zmp)} \end{aligned} \quad (6)$$

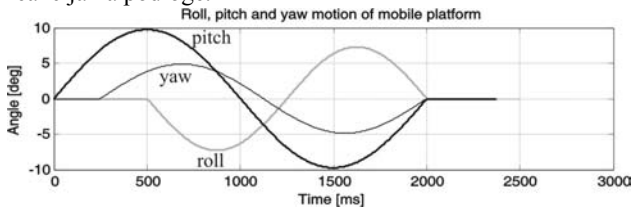
$$Q(\Delta M^{(zmp)}) = K_{PM} \Delta M^{(zmp)} + K_{IM} \int_0^T \Delta M^{(zmp)} dt$$

gde su  $M_0^{(zmp)} \in R^{2 \times 1}$  i  $M^{(zmp)} \in R^{2 \times 1}$  vrednosti nominalnih i stvarnih (merenih) dinamičkih momenata reakcije na stopalu oko x- i y-osa koje prolaze kroz TNM. Nominalne vrednosti momenata  $M_0^{(zmp)}$  se određuju off-line korišćenjem modela mehanizma (2) za zadatu nominalnu trajektoriju robota ili za željeni položaj mehanizma u slučaju mirovanja;  $\Delta M^{(zmp)} \in R^{2 \times 1}$  je vektor odstupanja dinamičkih reakcija od svojih nominalnih vrednosti;  $P_{dr} \in R^{2 \times 1}$  je vektor upravljačkih momenata oko x- i y-ose koji se realizuju primenom aktivnih zglobova nogu;  $K_{PM} \in R^{2 \times 2}$  i  $K_{IM} \in R^{2 \times 2}$  su kvadratne matrice proporcionalnih i integralnih pojačanja PI-regulatora. Radi jednostavnosti određivanja, ove matrice se usvajaju u dijagonalnoj formi  $K_{PM} = \text{diag}\{k_{pm}^j\}$ ,  $K_{IM} = \text{diag}\{k_{im}^j\}$ ,  $j = 1, 2$ . Karakteristični polinomi:  $f_j(s) = s^2 + k_{pm}^j s + k_{im}^j$ ,  $j = 1, 2$  služe da se nekom od metoda iz Teorije linearnih sistema upravljanja (metoda postavljanja polova, frekventna metoda, isl.) odrede servo-pojačanja regulatora;  $T$  u (6) je skalarna veličina koja označava vremenski period trajanja servisnog zadatka robota.

#### 4. REZULTATI I ZAKLJUČAK

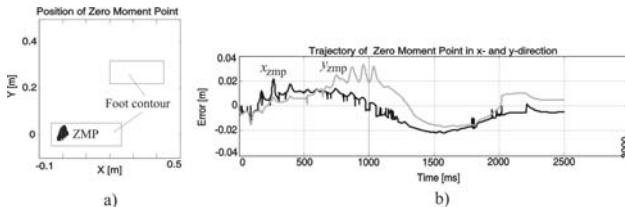
U cilju testiranja performansi predloženog kontrolera robota izvršeno je više simulacionih eksperimenata. Izabrana je struktura lokomocionog mehanizma [3] ukupne mase  $m = 70$  [kg]. Robot je postavljen na pokretnu platformu Stewart-ovog tipa kojoj je zadato periodično ugaono kretanje oko osa valjanja, propinjanja i skretanja (Sl. 3). Simularan je

model sistema robot-platforma u zatvorenoj sprezi s dve povratne grane: po veličinama stanja i dinamičkim reakcijama podloge.



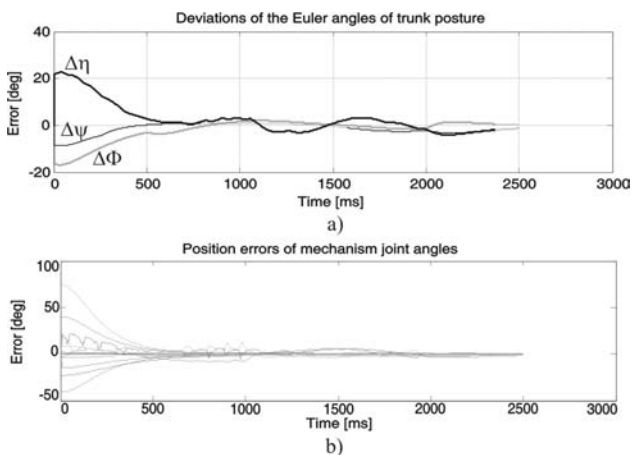
Sl.3. Periodično ugaono kretanje platforme zadato kao poremećaj koji dejstvuje na robotski sistem

Zahvaljujući prisustvu obe upravljačke sprege sintetizovani kontroler obezbeđuje traženu dinamičku ravnotežu i željeni položaj tela robota. Na taj način robot može da izvršava postavljene servisni zadatak. Na Sl. 4 su prikazani pokazatelji ostvarivanja dinamičke ravnoteže mehanizma u okviru izvedenog simulacionog eksperimenta.



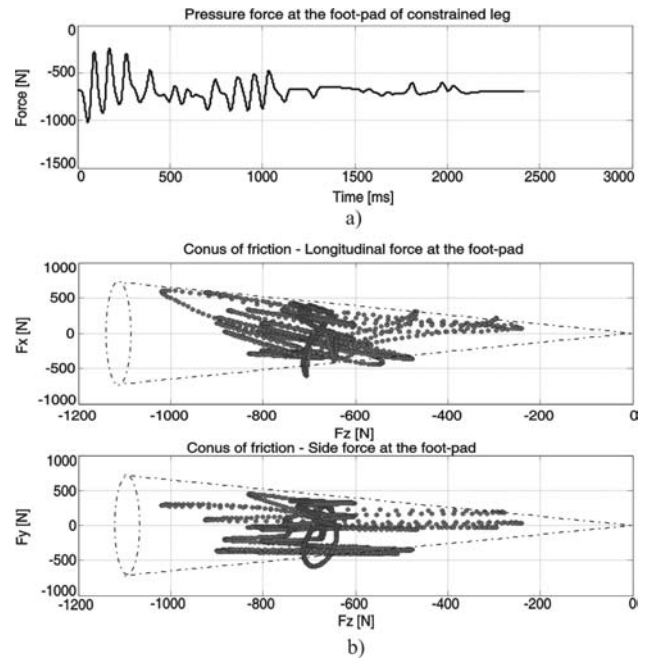
Sl.4. a) Relativni položaj TNM unutar konture oslonačkog stopala, b) Trajektorija TNM u x- i y-pravcima

Na Sl. 5 su prikazani simulacioni rezultati preciznosti ostvarivanja željenog, radnog položaja mehanizma robota u toku servisne operacije. Pri tom, projektovani kontroler obezbeđuje konvergenciju greški Ojlerovih uglova orijentacije trupa kao i greški pozicija zglobova mehanizma.



Sl.5. a) Konvergencija odstupanja Ojlerovih uglova od željenih vrednosti, b) Preciznost ostvarivanja željenih pozicija zglobova robota u toku operacije

Da bi servisni zadatak prikazan na Sl. 1 bio realno ostvarljiv potrebno je zadovoljiti i izvesne kriterijume konusa trenja klizanja. Na Sl. 6 su prikazane komponente uzdužne  $F_x$  i bočne sile  $F_y$  na stopalu oslonačke noge u odnosu na definisani konus trenja.



Sl.6. a) Sila pritiska na oslonačkom stopalu, b) konus trenja klizanja

## LITERATURA

- [1] The Wabian humanoid robot, <http://www.humanoid.waseda.ac.jp/>
- [2] The Honda humanoid robot, <http://www.humanoid.honda.co.jp/robot/>
- [3] M. Vukobratović, B. Borovac, D. Surla, D. Stokić, *Biped Locomotion - Dynamics, Stability, Control and Application*, Springer-Verlag, Berlin, 1990
- [4] M. Vukobratović, B. Borovac, Zero-Moment Point – Thirty-five Years of its life, *International Journal on Humanoid Robots*, World Scientific Publishing (Singapore) & Imperial College Press (London), Vol. 1, pp. 157-173, 2004
- [5] M. Sorli, M. Vukobratović, C. Ferraresi, B. Borovac, M. Kolarski, *Mechanics of Turin parallel robot, Mechanism and Machine Theory*, Vol. 32, No. 1, pp. 51-77, 1997
- [6] R. P. Paul, *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control, The Computer Control of Robot Manipulators*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1981.
- [7] M. Vukobratović, Yu. Ekalo, New Approach to Control of Robotic Manipulators Interacting with Dynamic Environment, *Robotica*, Vol. 14, pp. 31-39, 1996

**Abstract** – The control of dynamic balance as well as the control of relative trunk posture of humanoid robots operating in specific service tasks are considered in the paper. Under the trunk posture, the relative position of a robot's upper trunk segment with reference to the horizontal surface is assumed. The proposed control includes two loops: (i) the dynamic reactions feedback in the ZMP and, (ii) the state feedback.

## CONTROL OF DYNAMIC BALANCE AND TRUNK POSTURE OF HUMANOID ROBOTS OPERATING IN SERVICE TASKS

Aleksandar Rodić, Duško Katić, Mirjana Filipović