Zbornik radova 49. Konferencije za ETRAN, Budva, 5-10. juna 2005, tom IV

Proc. 49th ETRAN Conference, Budva, June 5-10, 2005, Vol. IV

SPREZANJE PLATFORME I BIPEDA

Mirjana Filipović, Milovan Živanović *Institut "Mihajlo Pupin", Beograd, Srbija i Crna Gora*
email: mira@robot.imp.bg.ac.yu

Sadržaj – *U ovom radu analizira se dinamika kretanja (sprezanje) platforme i bipeda. Mehanizam bipeda je vrlo složen mehanički sistem sa snažno prisutnim sprezanjem izmedju pojedinih stepeni slobode. Mehanizam platforme je takodje vrlo složen sistem čiji su stepeni slobode takodje medjusobno spregnuti. Ova dva složena sistema u kontaktu postaju jedan još složeniji sistem, čiji matematički model mora obuhvatiti sve elemente sprezanja izmedju postojecih stepeni slobode platforme i bipeda, medjusobno.*

1. UVOD

Do sada u literaturi autori su se više bavili konstruisanjem različitih tipova platformi, na primer Stewart platforma [3]. Mali broj radova bavi se temom koja analizira uzajamnu dinamiku kretanja platforme sa bipedom a jedan od prvih koji je dao doprinos razvoju ove teme je rad [5]. Ova tema se analizira u želji da se što realnije opiše uticaj dinamike kretanja bipeda na dinamiku kretanja platforme i obrnuto. Cela analiza u ovom radu će se odnositi na krutu konstrukciju bipeda (svi zglobovi su kruti) koja je u kontaktu sa krutom konstrukcijom platforme (gde su svi zglobovi, takodje, kruti). To je zato što je fenomen sprezanja sam po sebi dovoljno složen i nećemo ga ovde komplikovati prisustvom elemenata elastičnosti. Jasno je da u slučaju prisustva elemenata elastičnosti imamo još snažnije sprezanje izmedju bipeda i platforme i to ne samo preko inercijalnih, Koriolisovih i centrifugalnih sila već i preko sila elastičnosti.

2. SPREZANJE IZMEDJU BIPEDA I PLATFORME JE ELEMENTARNA KARAKTERISTIKA ROBOTSKIH SISTEMA

Posmatrajmo složeni robotski mehanizam koga čine kinematički lanci povezani rotacionim zglobovima, vidi radove [1], [2], a koji je šematski u opštem sučaju prikazan na Sl. 1.

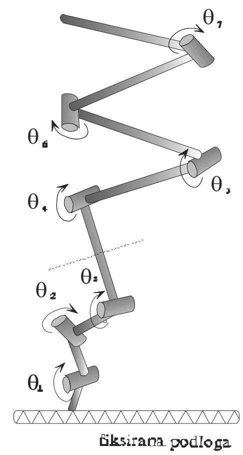
Jasno je da je sprezanje izmedju pojedinih stepeni slobode snažno prisutno, i da je nezamislivo da pri analizi ovakvog jednog sistema upravo fenomen sprezanja izostavimo. Sistem sa Sl. 1. opisan je jednačinom:

$$\tau = H(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta,\dot{\theta}) \qquad (1)$$

Jasno je da je matrica $H(\theta)$ puna matrica, sa elementima i van dijagonale, a da se prisustvo sprezanja ogleda i u vektoru $h(\theta,\dot{\theta})$ kroz Koriolisove i centrifugalne sile.

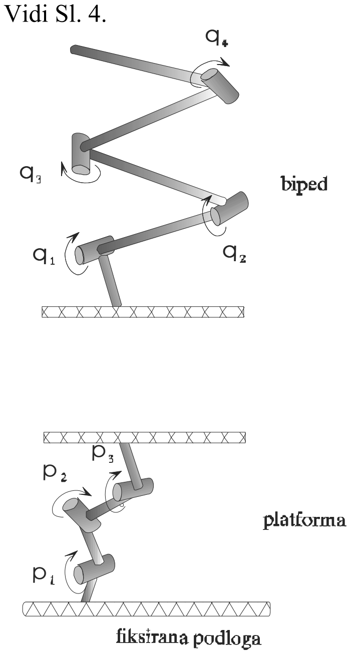
Podelimo ovaj složeni sistem na dva dela, što je predstavljeno na Sl. 2. Zamislimo da se gornji sistem kreće nezavisno od donjeg. Gornji nazovimo bipedom a donji platformom. Tako razdvojeni, oni zaista imaju nezavisna kretanja. Pošto nas zanima dinamika kretanja bipeda i platforme dok su u kontaktu, pretpostavimo upravo tu situaciju i spojimo ih tako da dobijemo sistem sa Sl. 3. Uporedi Sl. 1. i Sl. 3. One predstavljaju istu robotsku konfiguraciju. Napomenuli smo da izmedju pojedinih stepeni slobode na Sl. 1. egzistira snažno sprezanje, i zato je logično da isto tako egzistira snažno sprezanje izmedju pojedinih stepeni slobode bipeda i pojedinih stepeni slobode platforme.

Posmatrajući Sl. 3. vidimo da platformu i bipeda možemo da analiziramo kao jedan vrlo složen sistem sa izraženim sprezanjem izmedju prisutnih stepeni slobode.



Sl.1. *Složeni robotski mehanizam.*

U opštem slučaju biped ne mora da stupi u kontakt sa podlogom u tački A kao na Sl. 3. već u nekoj drugoj tački na primer B. Vidi Sl. 4.

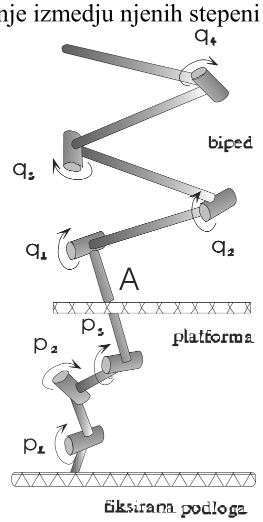


Sl.2. *Razdvojeni mehanizam bipeda i platforme.*

U tom slučaju ako nema proklizavanja izmedju bipeda i platforme onda je geometrija tog ukupnog složenog mehanizma poznata. Rastojanje ε živo učestvuje u dinamici kretanja sistema

Medjutim ako uzmemo u obzir proklizavanje onda se menja geometrija ukupnog mehanizma zbog promenljive veličine ε tokom realizacije zadatka. Uporedi Sl. 3. i 4. Možemo da radimo i sa izmenjenom geometrijom konstrukcije ali za sada (neka to bude ideja za neki budući zadatak) vratimo se našem problemu.

Ako platforma ima rotacione stepene slobode onda je nerealno pretpostaviti da su oni medjusobno raspregnuti jer takva konstrukcija fizički nema oblik i ne može se ni nacrtati ni realizovati, fizički. To znači da ona u stvari i nema svoju geometriju. Da bi stvarno modelirali platformu u kontaktu sa bipedom, treba je prvo skicirati kao realni mehanizam a onda i modelirati. Platforma je mehanizam koji ima svoju konstrukciju i geometriju i baš zbog tog njenog fizičkog postojanja sprezanje izmedju njenih stepeni slobode postoji.



Sl.3. *Složeni robotski mehanizam bipeda koji se kreće po platformi.*

Na gornjem delu Sl. 2. šematski je izdvojen i prikazan složeni mehanizam bipeda koji je opisan jednačinom:

$$\tau_q = H_q(q)\ddot{q} + h_q(q,\dot{q}) \qquad (2)$$

a na donjem delu Sl. 2. šematski je izdvojen i prikazan složeni mehanizam platforme koja je definisana sa:

$$\tau_p = H_p(p)\ddot{p} + h_p(p,\dot{p}) \qquad (3)$$

Ako pretpostavimo da robot hoda po platformi onda dobijamo jedan novi, slozeni sistem dat na Sl. 3.

Ovaj sistem je do sada analiziran sa pojednostavljenim sprezanjem izmedju bipeda i platforme. Autori su se snalazili i upravo to sprezanje su predstavljali aproksimativno i to na sledeći način. Uticaj dinamike kretanja platforme na pipeda je aproksimiran tako sto su na odgovarajuće mesto u rekurzivne relacije za izracunavanje brzine i ubrzanja kretanja prvog zgloba bipeda dodate brzine $\dot{\bar{s}}$ i ubrzanja $\ddot{\bar{s}}$ kretanja platforme.

$$\dot{\bar{s}} = [\dot{\bar{x}}_p \;\; \dot{\bar{y}}_p \;\; \dot{\bar{z}}_p \;\; \dot{\bar{\psi}}_p \;\; \dot{\bar{\theta}}_p \;\; \dot{\bar{\varphi}}_p]^T ,\; \ddot{\bar{s}} = [\ddot{\bar{x}}_p \;\; \ddot{\bar{y}}_p \;\; \ddot{\bar{z}}_p \;\; \ddot{\bar{\psi}}_p \;\; \ddot{\bar{\theta}}_p \;\; \ddot{\bar{\varphi}}_p]^T .$$

Na taj način su dobijene nove koordinate kretanja robota $\bar{q}$, $\dot{\bar{q}}$ i $\ddot{\bar{q}}$ i tada model bipeda ima sledeći oblik.

$$\tau_{\bar{q}} = H_{\bar{q}}(\bar{q})\ddot{\bar{q}} + h_{\bar{q}}(\bar{q},\dot{\bar{q}}) \qquad (4)$$

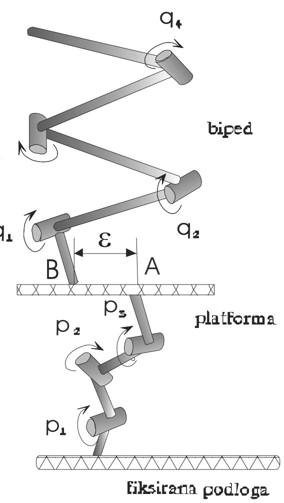
U ovom slučaju uticaj dinamike kretanja bipeda koja deluje na platformu je definisan silom $\bar{F} = [\bar{F}_x \;\; \bar{F}_y \;\; \bar{F}_z \;\; \bar{M}_z \;\; \bar{M}_y \;\; \bar{M}_x]^T$, a dinamika platforme je opisana sledećom jednačinom:

$$\tau_{\bar{p}} = H_{\bar{p}}(\bar{p})\ddot{\bar{p}} + h_{\bar{p}}(\bar{p},\dot{\bar{p}}) + \bar{J}^T \bar{F} \qquad (5)$$

Kompaktnije napisano tada je sistem sa Sl. 3. definisan sa:

$$\begin{bmatrix} \tau_{\bar{p}} \\ \tau_{\bar{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\bar{q}} & 0 \\ 0 & H_{\bar{p}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\bar{q}} \\ \ddot{\bar{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{\bar{q}} \\ h_{\bar{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ J^T \bar{F} \end{bmatrix} \qquad (6)$$

(Sve veličine koje imaju nadvičenu crticu se odnose na aproksimativni model (6)). Tako definisana veza izmedju bipeda i platforme prikriva dinamiku kretanja bipeda i dinamiku kretanja platforme koji su u kontaktu. Dinamička veza izmedju bipeda i platforme je daleko složenija.



Sl.4. *Veličina ε je saučesnik u dinamici kretanja posmatranog sistema.*

Mi, u ovom radu, insistiramo na punom sprezanju izmedju pojedinih stepenislobode bipeda i platforme, zato što je karakterisika sprezanja suštinska karakteristika robotskih sistema. U tom slučaju kretanje sistema sa Sl. 3. treba modelirati sledećom jednačinom.

$$\begin{bmatrix} \tau_{\theta_q} \\ \tau_{\theta_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\theta_q} & H_{\theta_{qp}} \\ H_{\theta_{pq}} & H_{\theta_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_q \\ \ddot{\theta}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{\theta_{qp}} \\ h_{\theta_{pq}} \end{bmatrix} \qquad (7)$$

koja obuhvata potpuno sprezanje izmedju svih prisutnih stepeni slobode.

Uključili smo sprezanje izmedju bipeda i platforme i to ne samo preko

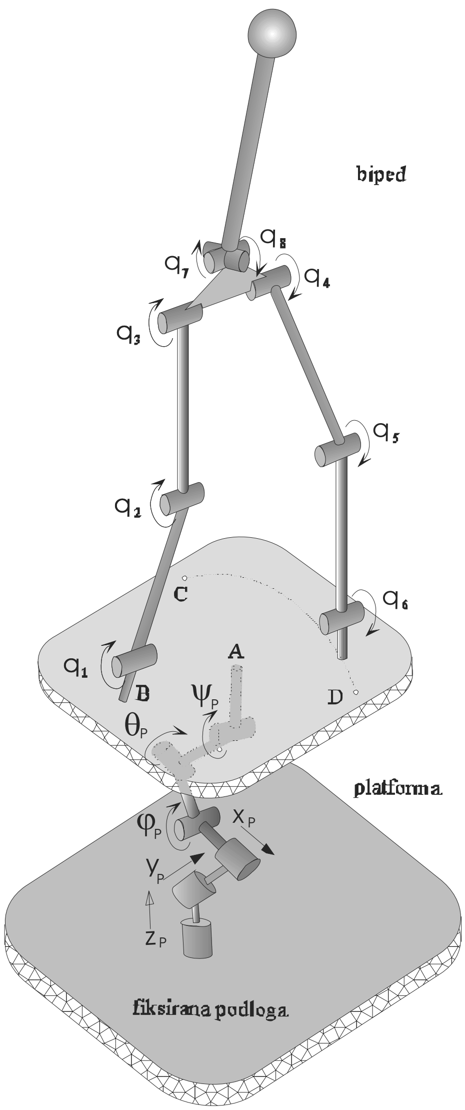
- vektora brzine platforme $\dot{s}$ i ubrzanja $\ddot{s}$ koji su jedna od karakteristika platforme. Egzistiraju i ostale karakteristike koja živo učestvuju u prenosu kretanja na bipeda. Nije dovoljno samo dodati brzine i ubrzanja $\dot{s}$, $\ddot{s}$ na odgovarajuće mesto u rekurzivne relacije, već treba uključiti prisutnu geometriju platforme koja obihvata pored ostalog i
- dužine prisutnih segmenata l_i,
- kretanja x_p, y_p, z_p, ψ_p, θ_p, φ_p koja se preko trigonometrijskih funkcija $\sin\psi_p$, $\sin\theta_p$, $\sin\varphi_p$,

$\cos\psi_p$, $\cos\theta_p$, $cos\varphi_p$... prenose na kretanje bipeda kao i
- položaj stopala u odnosu na platformu ε.

Na taj način u analizu kretanja bipeda uključujemo fizičku, opipljivu platformu sa prisutnom geometrijom a to znači prisutno sprezanje izmedju postojećih stepeni slobode platforme i puno sprezanje izmedju platforme i bipeda. Jednačina (7) definiše puno sprezanje izmedju bipeda i platforme a identična je sa jednačinom (1).

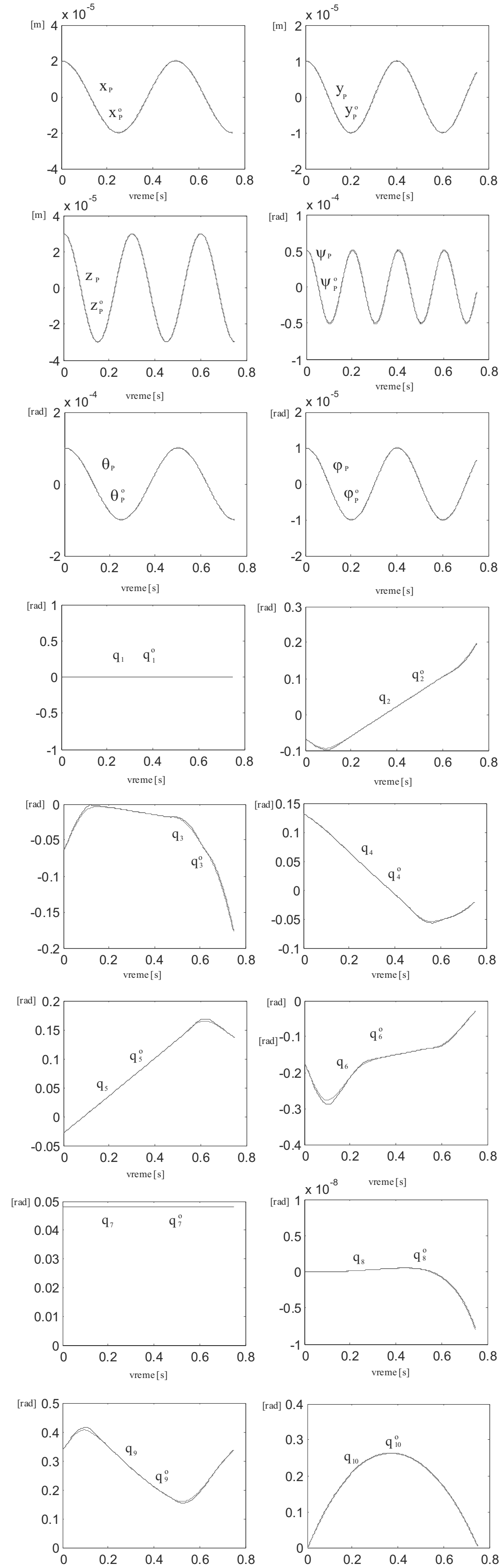
3. PRIMER I REZULTATI SIMULACIJA

U ovom radu je analizirano kretanje složenog sistema koji je prikazan na Sl. 5.

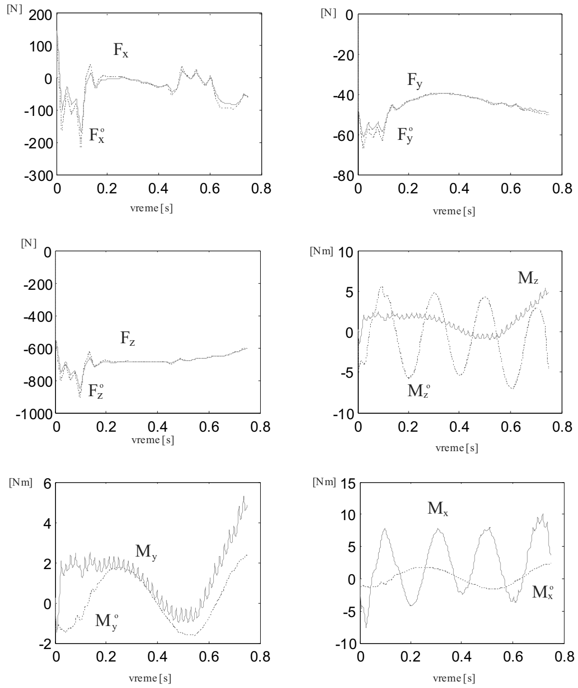


Sl. 5. *Humanoidni robotski sistem na platformi.*

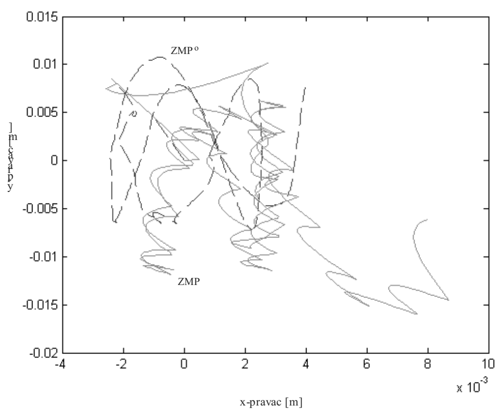
Sistem se sastoji od bipeda koji ima 10 stepeni slobode (svi su rotacioni) i platforme koja ima 6 stepeni slobode (tri su translatorna x_p, y_p, z_p a tri rotaciona ψ_p, θ_p, φ_p). Vrh leve noge humanoidnog robota kreće se iz tačke "C" u tačku "D" u propisanom vremenu od $T = 0.75[s]$ (vidi Sl. 5).



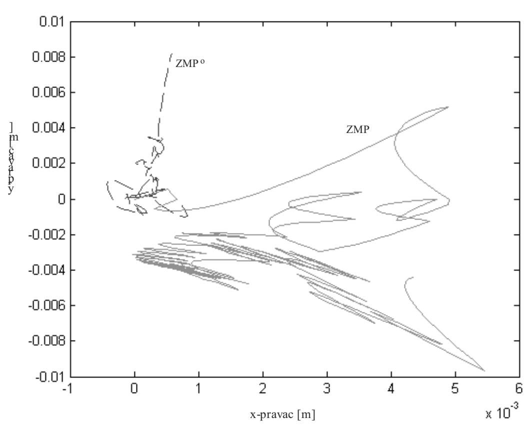
Sl. 6. *Nominalna i stvarna trajektorija kretanja motora za translatorne [m] i za rotacione stepene slobode [rad].*



Sl. 7. *Sila kojom biped deluje na platformu.*



Sl. 8. *ZMP tokom realizacije robotskog zadatka ako je platforma pokretna.*



Sl.9. *ZMP tokom realizacije robotskog zadatka ako je platforma nepokretna.*

Matematički model ovog sistema dat je jednačinom (7). Rezultati simulacija su dati samo za jedan odabrani set parametara. Vrednosti tih parametara kao i odabir upravljačkih pojačanja svakako značajno utiču na rezultate simulacija. Odabrano je upravljanje MID. Na Sl. 6. su prikazane nominalna i stvarna trajektorija uglova zakretanja motora za svih 16 stepeni slobode. Odstupanje stvarnih trajektorija od nominala je u zadovoljavajućim granicama ali zbog ograničenja na prostor nije ovde prikazano.

Na Sl. 7. je data sila reakcije $F = [F_x \ F_y \ F_z \ M_z \ M_y \ M_x]^T$ kojom biped deluje na platformu. Na Sl. 8. je dato kretanje ZMP, vidi [4], tokom realizacije ovog robotskog zadatka. Tačka ZMP je posebno interesantan pokazatelj opšte stabilnosti kretanja bipeda. U slučaju kada se biped kreće po nepokretnoj platformi, kretanje tačke ZMP je mirnije, što se vidi uporedjujući Sl. 8. i Sl. 9.

3. ZAKLJUČAK

U ovom radu je ukazano na činjenicu dinamičkog sprezanja izmedju bipeda i platforme tokom realizacije robotskog zadatka. U momentu kada biped stupi na platformu ova dva složena sistema u kontaktu postaju jedan još složeniji mehanički sistem. Matematički model ovog ukupnog sistema mora obuhvatiti sve elemente sprezanja izmedju stepeni slobode platforme i bipeda. Sprezanje je elementarna osobina robotskih sistema koju treba uzeti u obzir i pri analizi kretanja bipeda i platforme koji su u kontaktu.

LITERATURA

[1] M. Vukobratović, *Lokomocioni roboti i Antropomorfni mehanizmi & Dinamika aktivnih mehanizama,* Centar za multidisciplinarne studije Univerziteta u Beogradu, 1974.

[2] M. Vukobratović, B. Borovac, D. Surla, D. Stokić, *Scientific fundamentals of robotics*, Vol. 7, Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application*, Springer-Verlag, 1989.*

[3] M. Sorli, C.Ferraresi, M. Kolarski, B. Borovac, and M. Vukobratovic: "*Mechanics of turin parallel robot*", Mech. Mach Theory 32 (1), 51-77, 1997.

[4] M. Vukobratovic and B. Borovac, "*Zero-Moment Point - Thirty Five Years of its Life*" International Journal of Humanoid Robotics, Volume 1, Number 1, pp. 157-173, March 2004.

[5] M. Vukobratovic, V. Potkonjak and A. Rodic, *"Contribution to the dynamic study of humanoid robots interacting with dynamic environment"* ROBOTICA, Vol 22, pp 439-447, 2004.

Abstract – At the moment when a biped steps on a platform these two complex systems become one even more complex system. The mathematical model of this overall system has to include all the elements of the coupling between the degreees of freedom of the platform and biped. Coupling is an essential property of robot systems that has to be taken into consideration in modelling the motion of a biped and platform.

COUPLING BETWEEN A PLATFORM AND A BIPED

Mirjana Filipović, Milovan Živanović