

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Centar za nove tehnologije Katedre za proizvodno mašinstvo
Laboratorija za kibernetiku i mehatronske sisteme - CMSys Lab
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, SRBIJA

Tehničko rešenje CMSysLab 2012-02

**SISTEM ZA EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE
KONCEPTA SERVO-UPRAVLJANOG
ROBOTSКОG ZGLOBA
SA VARIJABILNOM KRUTOŠĆU**

Beograd, januar 2013.

Vrsta tehničkog rešenja	Laboratorijski prototip (M85)
Autori tehničkog rešenja	Prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Ivan Danilov, dipl. ing. maš.
Naziv tehničkog rešenja	Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću
Za koga je rađeno tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu Tehničko rešenje je razvijeno u okviru projekta TR35007: Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju
Ko koristi tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Godina realizacije tehničkog rešenja	2012.
Verifikacija rezultata	Od strane recenzenata: Prof. dr Janko Hodolič, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad Prof. dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Ko je prihvatio tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Primena rezultata	Laboratorija za Kibernetiku i mehatronske sisteme, Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

1. OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Tehničko rešenje: Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću, odnosi se na oblast robotike i jednu široku klasu tehnoloških zadataka u kojim robot ostvaruje mehanički, odnosno fizički kontakt sa svojim okruženjem. Upravljanje generalizovanom krutošću okviru ove klase zadatka je od suštinskog značaja.

Kao i kod čoveka, kontaktna sila je osnovni nosilac informacija na osnovu kojih se grade različiti algoritmi upravljanja za autonomno adaptivno ponašanje. U tom kontekstu bitna su dva aspekta. Prvi je adaptivno ponašanje i kompenzacija razlike između nominalnog zadatka i realnog stanja stvari u okruženju robota. Robotska montaža i proces netrivialnog spajanja delova je tipičan primer. Vektor generalizovane sile se koristi za upravljanje krutošću, kojom se ostvaruje popustljivost strukture robota i time vrši kompenzacija grešaka. U ovom konkretnom slučaju, generalizovana krutost svedena na vrh robota, mora da poseduje svojstva mehaničke izotropnosti.

Drugi aspekt je vezan za fizičku interakciju čoveka i robota, kojom se omogućava timski rad. Čovek rukama pomera popustljivu strukturu robota i tako ga obučava za izvršavanje određenog zadatka ili ostvaruje neke druge funkcije relevantne za tekuće interaktivne aktivnosti. Ovim se ulazi u jednu novu istraživačku oblast: industrijski humanoidni roboti. Industrijski humanoidi omogućavaju praktičnu realizaciju hibridnih proizvodnih sistema, odnosno sistema u kojima postoji specifičan simbiotski odnos između čoveka i robota u kojem se koriste prednosti robota i čoveka kao tehnoloških entiteta i tako se ostvaruju specifični zahtevi koje nameće nova proizvodna paradigma masovne kustomizacije. U okviru hibridnih sistema čovek i robot dele isti radni prostor u kojem timski rade.

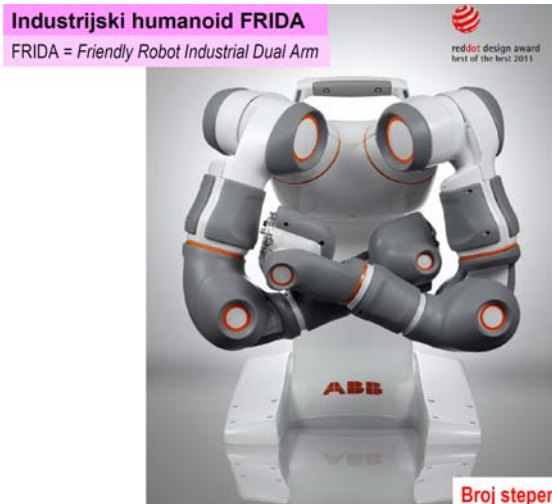
2. TEHNIČKI PROBLEM

Krutost robota u kontekstu koji se ovde razmatra mora da bude varijabilna i zato ne može da bude ugrađena u mehaničku strukturu. Iz tehnoloških razloga popustljivost industrijskih humanoida mora da bude programabilna, a to praktično znači da idealni robot mora da poseduje apsolutno krutu mehaničku strukturu i popustljiv aktuatorni sistem, čija je krutost programabilna.

U realnosti, robot poseduje popustljive segmente i popustljiv aktuatorni sistem. Ipak, popustljivost segmenata je za više redova veličina veća od popustljivosti aktuatornog sistema, tako da su dominantni izvor popustljivosti robota njegovi zglobovi. U ovom smislu nameću se dva osnovna zadatka koji se mogu smatrati tehničkim problemom: 1) zadatak upravljanja krutošću servo-upravljanog zgloba robota i 2) upravljanje generalizovanom krutošću robota, u ovom slučaju antropomorfne strukture na osnovu upravljanja krutošću servo-upravljanog zglobova robota. Rešavanje ovih zadataka je vrlo delikatan tehnički problem i njegovo rešenje ima veliki značaj za koncept industrijskih humanoidnih robota.

3. STANJE TEHNIKE

Koncept industrijskih humanoida razvija se eksponencijalnim ubrzanjem akumulacije istraživačkih aktivnosti (na primer, FP6 projekti: PHRINEDS i SMERobot, FP7 projekat: ROSETTA, i prekomercijalni projekat humanoida DLR/KUKA LWR IV). Primer industrijskog humanoida FRIDA koji je razvijen u okviru FP7 projekta ROSETTA naveden je na slici 1. To je redundantni bimanualni robot sa 2 x 7 serijskih stepeni slobode i proporcijama koje odgovaraju odraslom muškarcu srednje visine. Upravljanje po impedansi / admitansi dvorukog mehanizma, omogućava fleksibilnost i tehnološku kompletnost u kooperativnom radu ruku na zadacima montaže. Robot je prilagodjen za timski rad sa čovekom i drugim robotima na linijama za montažu u maloserijskoj proizvodnji.



- FP6 Projekat **PHRIENDS**
Physical Human-Robot Interaction: Dependability and Safety, 2006-2009. god., panevropski konzorcijum od 6 institucija
- FP6 Projekat **SMErobot**
The European Robot Initiative for Strengthening the Competitiveness of SMEs in Manufacturing, 2005-2009. god., koordinator Fraunhofer IPA, budžet **14.9 MIO EUR**, Konzorcijum od 22 institucije, 14 industrijskih kompanija.
- DLR – KUKA **LWR IV** industrijski humanoid
- FP7 Projekat **ROSETTA**
Robot control for Skilled Execution of Tasks in natural interaction with humans; based on Autonomy cumulative knowledge and learning, 2009-2013. god. budžet **10 MIO EUR** (large-scale integrated project, Challenge 2: Cognitive systems, Interaction, Robotics), konzorcijum 8 institucija, 3 industrijske kompanije, koordinator ABB Robotics.

Broj stepeni slobode: 14



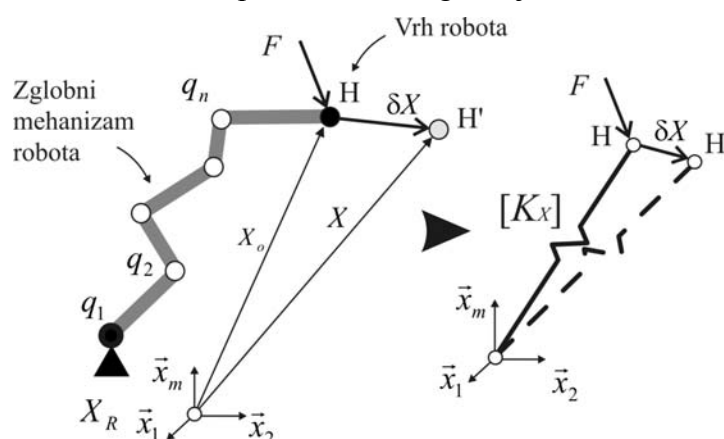
Slika 1: Prikaz robota bimanualnog industrijskog humanoida FRIDA (*Friendly Robot Industrial Dual Arm*) razvijenog u okviru FP7 projekta ROSETTA za bezbedan kooperativni rad sa čovekom na linijama za montažu.

Prateći ovaj trend, u okviru Katedre za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, pokrenut je korpus istraživačko-razvojnih aktivnosti sa ciljem da se sadržaji ove vrste približe akademskom i industrijskom prostoru Srbije. Ove aktivnosti su smeštene u okvir projekta TR 35007.

4. KONCEPT TEHNIČKOG REŠENJA

4.1 Generalizovana krutost

Polazne osnove na kojima je bazirano tehničko rešenje servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću prikazano je na slici 2. Dalje se navode osnove analitičkog modela generalizovane krutosti robota antropomorfne konfiguracije.



Slika 2: Model generalizovane krutosti industrijskog humanoida antropomorfne konfiguracije.

Po definiciji, generalizovana krutost manipulacionog robota u spoljašnjem koordinatnom sistemu Q_R (koordinatni sistem radnog zadatka), određena je opštom relacijom:

$$F = K_x (X - X_0) = K_x \delta X \quad (1)$$

gde je: $F \in R^m$ - spoljašnja sila koja deluje na vrh robota (tačka H šematskog prikaza robota na slici 2), $K_X = K_H \in R^{m \times m}$ - simetrična matična funkcija generalizovane krutosti manipulacionog robota, $X_0 \in R^m$ - vektor nominalnog položaja vrha robota, $X \in R^m$ - vektor stvarnog položaja vrha robota i $\delta X \in R^m$ - vektor pomeraja vrha robota (odziv na pobudu silom F).

Uticaj krutosti segmenata kinematskog mehanizma robota na generalizovanu krutost je najčešće od sekundarnog značaja. Dominantan uticaj ima popustljivost aktucionog sistema. Za uslov malih odstupanja od nominalne trajektorije, primenom Jakobijanovog matičnog operatora relacija (1) se dovodi na oblik:

$$F = K_X J(q) \delta q, \quad (2)$$

pri čemu je $\delta q = (q - q_0) \in R^n$ - vektor pomeraja zglobova robota. Relacija koja povezuje spoljašnje opterećenje vrha robota F i vektor pogonskih sila/momenata u zglobovima robota $\tau \in R^n$ koji uravnotežava dejstvo tog spoljašnjeg opterećenja glasi:

$$\tau = J(q)^T F \quad (3)$$

Smenom (2) u (3) izvodi se osnovna relacija kojom se vrši preslikavanje matične funkcije generalizovane krutosti K_X u domen aktucionog sistema manipulacionog robota:

$$\tau = J^T(q) K_X J(q) \delta q, \quad (4)$$

Relacija (4) definiše aktucionu matricu krutosti K_q kao kongruentni transformat matične funkcije generalizovane krutosti K_X u algebarski prostor određen unutrašnjim koordinatama robota:

$$K_X \rightarrow K_q = J^T(q) K_X J(q), \quad K_q \in R^{n \times n}, \quad (5)$$

Aktuaciona matrica krutosti, odnosno matrica krutosti aktucionog sistema robotskog mehanizma je simetrična (kongruentna transformacija održava simetričnost!), pozitivno definitna i u opštem slučaju nedijagonalna.

Ključni zadatak u upravljanju generalizovanim krutošću industrijskog humanoida je realizacija takvog aktucionog sistema koji uvek može da generiše aktucionu matricu krutosti definisanu relacijom (5).

4.2 Varijabilna generalizovana krutost

Svojstva aktucionog sistema koji zadovoljava relaciju (5) se u opštem slučaju ne mogu ostvariti rešenjima koja se koriste kod konvencionalnih robota. Relacija (5) ima opštu ostvarivost tek kroz okvir redundanse i to aktucione i/ili kinematske.

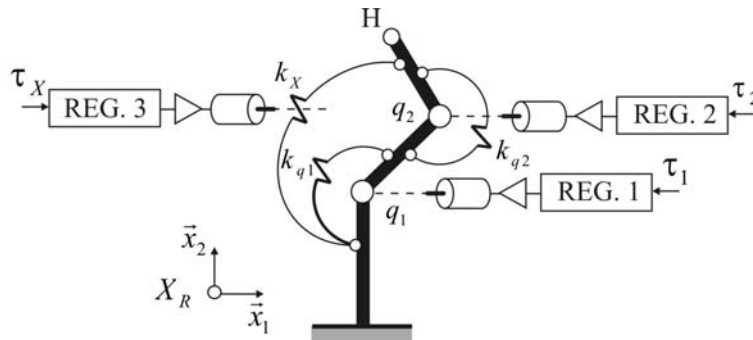
Aktuaciona redundansa: Aktuacionom redundansom moguće je generisati nedijagonalne članove matrice K_q . Aktuaciona redundansa podrazumeva uvođenje dopunskih aktuatora koji, pored postojećih neredundantnih aktuatora, dodatno simultano pogone po dva različita stepena slobode. Redundansa ove vrste prikazana je na slici 3 na primeru jednostavnog planarnog robota sa dva stepena slobode. Treći aktuator koji simultano pogoni prvi i drugi stepen slobode prisutan je u nedijagonalnom članu aktucione matrice krutosti:

$$K_q = \begin{bmatrix} k_{q1} + k_x & k_x \\ k_x & k_{q2} + k_x \end{bmatrix} \quad (6)$$

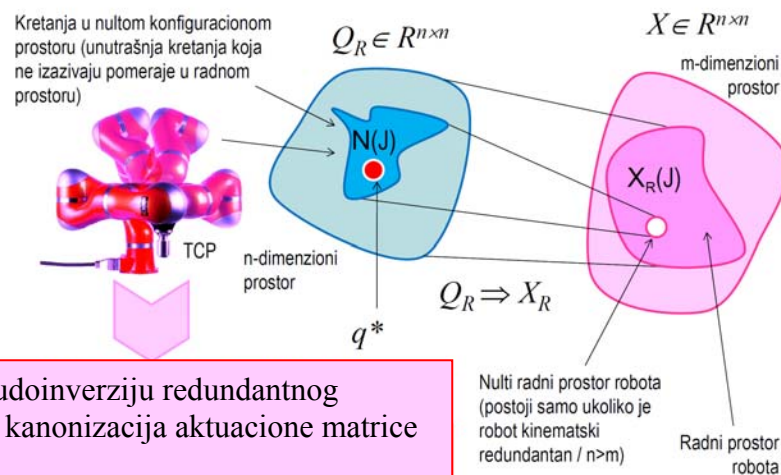
Ovim, redundantnim aktuatorom, obezbedjuje se opštost rešenja kongruentne transformacije (5).

Koncept aktucione redundancije u osnovi nije veštački koncept. Aktuaciona redundansa ove vrste je široko prisutna kod biomehaničkih sistema, i kod čoveka takodje. Na primer,

grupe antagonističkih mišića: *coracobrachialis*, *biceps caput longum*, *biceps caput breve* i *triceps brachii caput longum*, simultano pokreću složeni zglob ramena i zglob lakta ljudske ruke, analogno modelu sa slike 3. Kod tehničkih sistema fizička realizacija redundantne aktucije je vrlo delikatan inženjerski zadatak, što jako limitira praktičnu vrednost ovog pristupa.



Mur-Penrouz pseudoinverzija Jakobijana



Uslov za pseudoinverziju redundantnog Jakobijana je kanonizacija aktucione matrice krutosti

Slika 3: Gore: primer aktucione redundanse kojom se uvek zadovoljava relacija (5) u opštem slučaju; Dole: preslikavanje konfiguracionog u radni prostor i nulti konfiguracioni prostor redundantnog robota.

Kinematska redundansa: Alternativni pristup, koje ima bitno veću praktičnu vrednost je takodje baziran na redundansi, ali u ovom slučaju je to kinematska redundansa.

Osnova ovog pristupa bazirana je na hipotezi koja glasi: Izborom odgovarajućeg konfiguracionog podprostora nule unutar konfiguracionog prostora kinematski redundantnog robota sa k redundantnih stepeni slobode mogu simultano zadovoljiti: 1)uslov sledjenja nominalne trajektorije vrha robota u pripadajućem radnom prostoru, 2)uslov nominalne generalizovane krutosti vrha robota K_{X0} i 3)uslov kanonične forme matrice aktucione krutosti.

Koncept konfiguracionog prostora nule Jakobijanove matrice prikazan je na slici 3. Kinematska preodredjenost generiše podprostor u okviru konfiguracionog prostora koji sadrži konačni skup vektora koji zadovoljavaju relaciju:

$$N(J(q)) = \{q : J(q)q = 0\} \quad (7)$$

Prostor nule $\mathcal{N}(J(q))$ omogućava unutrašnje kretanje mehanizma redundantnog robota koje ne izaziva kretanje vrha robota u njegovom radnom prostoru. Unutrašnja pokretljivost omogućava pronalaženje bar jednog vektora:

$$q^* \in N(J(q)) \quad (8)$$

koji zadovoljava sistem algebarskih jednačina:

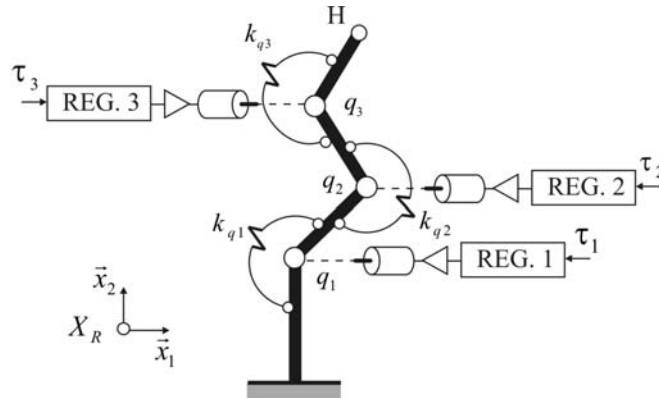
$$x_0 = f(q^*) \quad (9)$$

$$k_{q_{ij}}(q^*) = 0, \quad \forall i \neq j, \quad k_{q_{ij}} \in K_q(q) \quad (10a)$$

$$q^* \rightarrow \min(k_{q_{ij}}(q)), \quad \forall i \neq j, \quad k_{q_{ij}} \in K_q(q) \quad (10b)$$

izvedenih iz polazne hipoteze. Relacija (10a) svodi matricu Kq na kanoničnu formu. Relacija (10b) je manje restriktivna i matricu Kq svodi na njenu kvazikanoničnu formu. Manja restriktivnost relacije (10b) je inženjersko rešenje problema koje ima veću praktičnu vrednost.

Primer kinematski redundantnog robota koji je funkcionalni ekvivalent aktuatorno redundantnog robota prikazan je na slici 4. Treći popustljivi aktuator u kombinaciji sa dva osnovna (neredundantna) aktuatora, koji su takodje popustljivi, zadovoljava relaciju (5) za uslov (9) i (10b).



Slika 4: Primer kinematske redundanse kojom se zadovoljava relacija (5).

Sinteza upravljačkog zakona kinematskog redundantnog robota zahteva inverziju Jakobijana. Kinematska redundansa generiše pravougaonu Jakobijanovu matricu, pa se u ovom slučaju koristi kompleksan pristup definisan Moore-Penrose pseudoinverzijom u obliku:

$$J^+(q) = J(q)^T (J(q)J(q)^T)^{-1} \quad (11)$$

Pseudoinverzija (11) uvek postoji za Jakobijanovu matricu. Računska kompleksnost pseudoinverzije limitira njenu praktičnu primenljivost, pa se iz tog razloga uvode dodatni kriterijumi. Ovi kriterijumi imaju za cilj da uvedu dodatne relacije u nulti konfiguracioni prostor robota $\mathcal{N}(J(q))$, kao na primer energetski minimum, izbegavanje kolizija ili heuristički kriterijum imitacije kretanja ljudske ruke. U okviru ovog istraživanja nudi se jedno originalno inženjersko rešenje bazirano na dodatnom uslovu sadržanom u relaciji (10 a / b). Ovim uslovom, koji je izveden iz tehnološkog konteksta radnog zadatka robota, praktično se redukuje kinematska preodredjenost i tako konfiguracioni prostor humanoidnog robota prevodi u neredundantni. U cilju pronalazjenja vektora q^* koje je dovoljno daleko od singulariteta, može se uz uslov (9a) uvesti dopunski uslov izveden iz Jošikavinog kriterijuma manipulabilnosti:

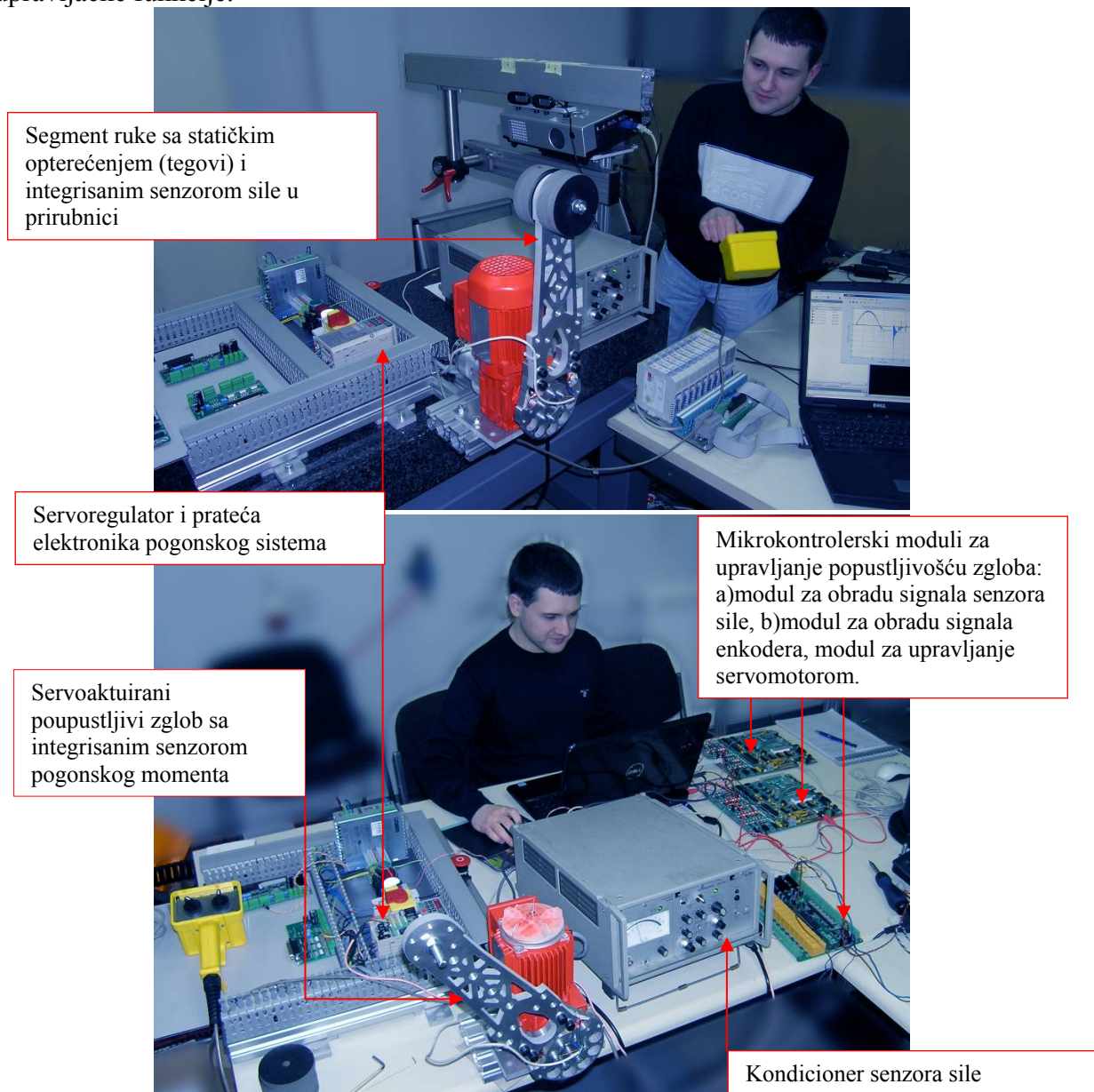
$$U(q) = \sqrt{\det(J(q)J^T(q))} \quad (12)$$

U kontekstu definisanih varijantnih koncepata za ostvarivanje generalizovane krutosti preko kinematske i aktuatorne redundanse, realizovan je sistem za eksperimentalno ispitivanje

koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću, EHR-MZ01, kao tehničko rešenje u obliku laboratorijskog prototipa

5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Eksperimentalna instalacija za testiranje koncepta mekog zgloba EHR-MZ01, odnosno laboratorijski prototip akcionog sistema jedne servoupravljanje ose industrijskog humanoidnog robota prikazana je na slici 5. Laboratorijski prototip se sastoji iz specifičnog hardvera i ekstenzivnog skupa softverskih rutina za obradu senzorskih signala i realizaciju upravljačke funkcije.



Slika 5: Eksperimentalna instalacija za testiranje koncepta mekog zgloba EHR-MZ01 (rezultat samogradnje i sopstvenih razvojnih aktivnosti u celosti: mehanika, upravljački sistem i senzorski sistem). Gore: prva funkcionalna proba. Dole: dovodenje sistema u funkcionalno stanje i prvi upravljački algoritmi za osnovnu proveru koncepta.

Hardverski sistem se sastoji iz sledećih funkcionalnih modula: 1) noseća struktura izvedene od Al profila sa fizičkim interfejsom za vezu sa granitnim stolom, 2) modul optičkog servoupravljanog zgloba sa prenosnikom, uležištenjem, obrtnm davačem polažaja i

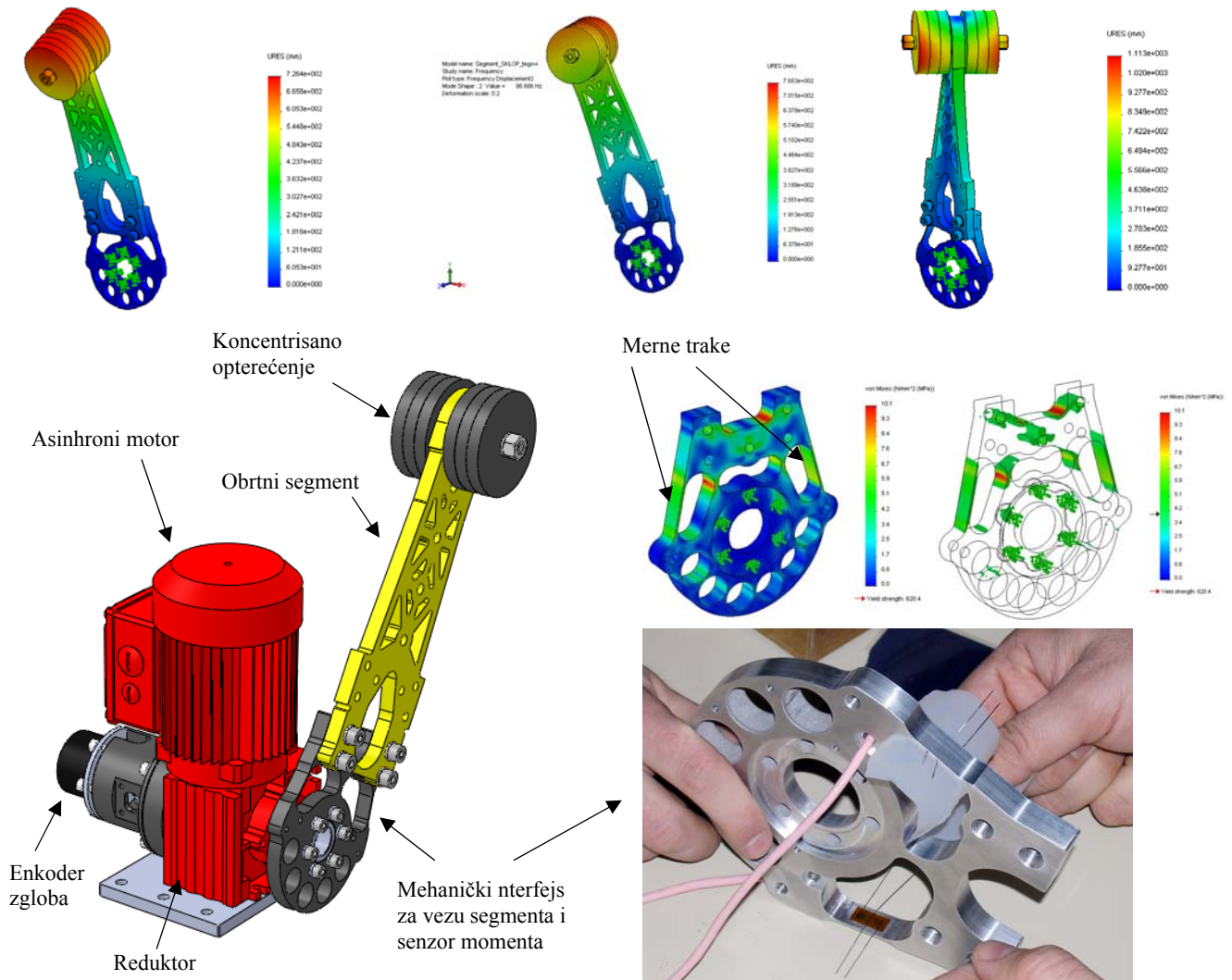
interfejsom za vezu segmenta, 3) segment robota sa integrisanim senzorom sile i kondicionerom za merenje opterećenja zgloba i sa interfejsom za priključivanje statičkog opterećenja, 4) hardver upravljačkog sistema i regulator za upravljanje radom motora, 5) PC kompjuter koji za razvoj aplikativnog upravljačkog koda i 6) PC kompjuter sa odgovarajućim akvizicionim modulima za snimanje upravljačkih i senzorskih veličina.

Upravljački hadver je baziran na mikrokontrolerima serije PIC 18F45K22 koji su međusobno spregnuti preko brze SPI serijske komunikacije, tako da u funkcionalnom smislu čine jedinstven sistem. Distribucijom radnog zadatka omogućeno je ostvarivanje odličnih dinamičkih performansi sistema upravljanja u celini.

Prvi oblik oscilovanja, $f_1=15.5\text{Hz}$

Drugi oblik oscilovanja, $f_2=86.6\text{Hz}$

Treći oblik oscilovanja, $f_3=131.3\text{Hz}$



Slika 6: Konstrukcioni koncept mekog zgloba industrijskog humanoida EHR-MZ01. Pogonski sistem je baziran na kaveznom asinhronom motoru upravljanim pomoću frekventnog regulatora sa mogućnošću upravljanja vektorom magnetskog fluksa. Ugaona koordinata zgloba i ugaona brzina prate se pomoću brojačkog enkodera ugrađenog na izlaznom vratilu. Pogonski moment koji se prenosi na segment robota prati se pomoću senzora sile baziranog na mernim trakama (varijanta polovinskog i punog mosta). Detalj tela senzora sile integrisanog u segment robot prikazana dole levo. Gore desno je prikazan jedan od oblika oscilovanja segmenta sa tegom kojim se unosi statička komponenta opterećenja (izvršena je kompletna identifikacija mehaničkih svojstava segmenta u statičkom i dinamičkom domenu). U donjem desnom uglu je prikazana fotografija detalja mernog mosta. Sve mehaničke komponente su fizički izrađene u Zavodu za mašine alatke, Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Prvi mikrokontrolerski modul vrši obradu pogonskog/reaktivnog momenta zgloba i u realnom vremenu prosleđuje preko svog serijskog interfejsa informaciju o momentu nadređenom računarskom modulu. U cilju postizanja maksimalne brzine odziva primenjena je osmorbitna analogno-digitalna konverzija senzorskog signala koji se dovodi iz odgovarajućeg kondicionera (eksterni modul HBM KWS82, za narednu godinu se planira izrada sklopa kondicionera integrisanog u prirubnicu segmenta robota, neposredno uz pretvaračke elemente). Drugi mikrokontrolerski modul vrši obradu signala koji generiše enkoder za merenje ugaonog položaja zgloba i merenje njegove ugaone brzine. Izračunata trenutna vrednost ugla i brzine se u realnom vremenu prosleđuje preko serijskog interfejsa nadređenom računarskom modulu. Treći mikrokontrolerski modul prihvata senzorske signale, obrađuje ih i u skladu sa ugrađenim zakonom upravljanja generiše digitalne i analogne upravljačke signale za upravljanjem krutosti zgloba. Ovaj modul preko svog serijskog interfejsa prosleđuje (i prima) informacije HMI modulu, preko koga se vrši sprega čoveka i upravljačkog sistema.

Softverski sistem koji je sastavni deo tehničkog rešenja se sastoji iz skupa rutina neophodnih za ostvarivanje sledećih funkcionalnosti: 1) rutine za obradu signala senzora sile i generisanje informacije o pogonskom momentu/opterećenju, 2) rutine za obradu signala obrtnog davača položaja (brojački enkoder) i generisanje informacije o ugaonom položaju i ugaonoj brzini izlazne osovine, 3) rutine za generisanje upravljačkih komandi servoregulatora, 4) akvizicione rutine i rutine za vizuelizaciju stanja zgloba robota. Navedene rutine su rezlizovane u assembleru i mikroC razvojnom okruženju (namenska biblioteka rutina za rad sa mikrokontrolerima) i delom u Matlab razvojnom okruženju, uz primenu odgovarajućih interfejsa za interakciju sa komponentama senzorskog i upravljačkog hardvera.

6. ZAKLJUČAK

Laboratorijski prototip koji se kao tehničko rešenje obradjuje u ovom materijalu, je rezultat pionirskih aktivnosti u našem naučno-istraživačkom prostoru i ima za cilj sticanje elementarnih praktičnih saznanja i iskustva u oblasti gradnje industrijskih humanoidnih robota. Ovim rešenjem je stvorena fizička eksperimentalna platforma otvorene arhitekture za proveru osnova koncepta programabilnog upravljanja krutošću zgloba robota i praktičnu validaciju varijantnih zakona upravljanja na bazi mehaničke impedanse.

7. LITERATURA

- [1] F. Jovane, E. Westkämper and D. Williams, "THE MANUFUTURE ROAD - Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing", Springer, 2009.
- [2] F. Jovane, Y. Koren, C.R. Boër, "Present and Future of Flexible Automation - Towards NewParadigms", CIRP Annals – Manufacturing Tech., Vol. 52, Issue 2, pp. 543–560, 2003.
- [3] ISO10218: Robots for industrial environments - Safety requirements - Part 1: Robot. 2006. American National Standards Institute: American National Standard for Industrial Robots and Robot Systems - Safety Requirements, ANSI/RIA R15.06-1986, 1986.
- [4] A. Albu-Schaffer, S. Haddadin, Ch. Ott, A. Stemmer, T. Wimblock and G. Hirzinger, "The DLR lightweight robot: Design and control concepts for robots in human environments", Industrial Robot: An International Journal 34/5, pp: 376–385, 2007.
- [5] Petrović, P., Hodolić, J., Vićentić, A., Pilipovic, M., Jakovljević, Ž., Danilov, I., Lukić, N., Baltić, P., Vukelić, Dj., Budak, I., Hažistević, M., Miković, V., "Intelligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju – TR35007", Zbornik radova 38. JUPITER konferencija, UVODNI RAD, Beograd 2012, str. UR49-UR66.
- [6] Petrović, P., Lukić, N., Danilov, I., "Industrijski humanoidi - novi koncept robota za kolaborativni rad čovek-mašina u sistemima za robotsku montažu", 38. JUPITER konferencija, NU-ROBOTI-FTS, Beograd 2012, str. 3.126-3.139, ISBN: 978-86-7083-757-7
- [7] A.M. Zanchettin, L. Bascetta, P. Rocco - "Human-like redundancy resolution for anthropomorphic industrial manipulators", IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 102/3
ДАТУМ: 24.01.2013.

На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Петра Петровића бр. 102/1 од 17.01.2013. године, одлуке о именовању рецензента и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 24.01.2013. године, донело је следећу

О Д Л У К У

Прихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта ТР 35007, под насловом: **„Систем за експериментално испитивање концепта серво-управљаног роботског зглоба са варијабилном крутошћу“**, чији су аутори: проф.др Петар Петровић, дипл.инж.маш. Никола Лукић и дипл.инж.маш. Иван Данилов, а позитивну рецензију поднели: проф.др Јанко Ходолич, ФТН Нови Сад и др Мирослав Пилиповић, ред.проф. у пензији.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.



ПРОДЕКАН
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ

Проф.др Војкан Лучанин

Odlukom Istraživačko-stručnog veća Mašinskog fakulteta u Beogradu br. 102/2 od 17.01.2013. godine imenovani smo za recenzente tehničkog rešenja **Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću**, autora: prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš. i Ivan Danilov, dipl. inž. maš. Na osnovu predloga ovog tehničkog rešenja podnosimo sledeći:

IZVEŠTAJ

Tehničko rešenje: **Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš. i Ivan Danilov, dipl. inž. maš., opisano je na 9 stranica A4 formata pisanih sa 12pt singl proreda, sadrži 6 slika. Sastavljeno je od šest poglavlja i spiska korišćene literature. Naslovi poglavlja su:

1. Oblast na koju se tehničko rešenje odnosi
2. Tehnički problem
3. Stanje tehnike
4. Koncept tehničkog rešenja
5. Detaljan opis tehničkog rešenja
6. Zaključak

Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću, razvojna oznaka EHR-MZ01, nastao je kroz dvogodišnje istraživačko-razvojne aktivnosti na projektu TR 35007 sa ciljem stvaranja multifunkcionalne eksperimentalne platforme za praktično ispitivanje koncepta mekog zgloba za novu generaciju industrijskih robota sposobnih za timski rad sa čovekom u zajedničkom radnom prostoru. Timski rad je preduslov za realizaciju hibridnih sistema koji kao novi tehnološki entitet predstavljaju odgovor na zahteve nove proizvodne paradigme masovne kastomizacije, gde se simbiotski odnos čoveka i robota pojavljuju kao generička osnova ove tehnologije. Timski rad podrazumeva širok spektar interakcije čoveka i robota, uključujući i fizički kontakt, koji imperativno mora da poseduje elemente bezbednosti. Bezbedan fizički kontakt je moguće ostvariti samo kroz primenu popustljivih zglobova i malu masu robota, uz prateći upravljački sistem koji mora da bude svestan svoga okruženja i da intenzivno sa njim komunicira. Ovo tehničko rešenje predstavlja konkretan rezultat pionirskih aktivnosti u oblasti industrijskih humanoidnih robota u istraživačkom prostoru Srbije i konkretan doprinos istraživača na projektu TR 35007 domaćoj nauci u domenu proizvodnih tehnologija.

U prvom poglavlju se navode osnovne informacije o industrijskim humanoidima kao novom konceptu industrijskih robota, uz navodjenje relevantnih istraživačkih projekata u svetskim okvirima u kojima se industrijski humanoidi razmatraju kao osnovni istraživački zadatak. U okviru ovog poglavlja industrijski humanoidi se posmatraju sa aspekta popustljivosti njihove mehaničke strukture, pri čemu je posebna pažnja na programabilnu popustljivost, odnosno upravljanje generalizovanom krutošću u statičkom i dinamičkom domenu.

U drugom poglavlju se definiše suština istraživačkog i inženjerskog okvira upravljanja generalizovanom krutošću serijskih redundantnih struktura kroz dva varijantna pristupa: upravljanje na bazi redundantne aktuacije i upravljanje na bazi kinematske redundanse. Pored aspekata generalizovane krutosti, razmatra se generički problem koncepta i konstruktivnog rešenja (misli se na mehatronske konstruktivne aspekte) servo-upravljanog zgloba industrijskog humanioda sa svojstvom varijabilne i upravljive / programabilne krutosti – krutost, odnosno popustljivost kao tehnološka veličina. U ovom poglavlju se razmatra problematika uvođenja povratne sprege po sili kao ključne regulacione veličine.

U trećem poglavlju se daje detaljan pregled istraživačkih aktivnosti u svetskim okvirima za oblast upravljanja generalizovanom krutošću i navode se konkretna konstruktivna rešenja akcionog sistema ove vrste koja su razvijena sa ciljem praktične validacije koncepta.


U četvrtom poglavlju se detaljno navodi koncept ostvarenog tehničkog rešenja eksperimentalnog sistema koji je baziran na servoupravljanom asinhronom motoru sa kaveznom rotorom, snage 120W i odgovarajućim reduktorom sa spiroplan ozubljenjem (reduktor samokočiv) i robotskim segmentom u koji je integrisan senzorski sistem za merenje pogonskog momenta, odnosno momenta opterećenja. Takođe, u ovom poglavlju se detaljno navodi koncept upravljačkog sistema kojim je omogućena implementacija različitih varijantnih rešenja upravljačkih zakona kojim se upravlja karakteristikom krutosti zgloba u statičkom i dinamičkom domenu.

U petom poglavlju navodi se detaljan opis konstruktivnog rešenja mehanike zgloba, zatim detalji senzora sile i različitih aspekata njegove integracije u pogonjeni segment robota, uključujući i rezultate sprovedene analize/optimizacije u statičkom i dinamičkom domenu i takođe detalji vezani za kondicioniranje signala senzora sile. Posebna pažnja je posvećena opisu upravljačkog hardvera koji je baziran na multirpocesorskom sistemu upravljanja sa distribuiranom upravljačkom funkcijom. Pored opisa konstruktivnog rešenja eksperimentalnog sistema navode se i primeri zapisa senzorskih i upravljačkih signala u realnom vremenu, na osnovu kojih je moguć uvid u ponašanje popustljivog zgloba i prepoznavanje slabosti i dobrih strana primenjenog zakona upravljanja.

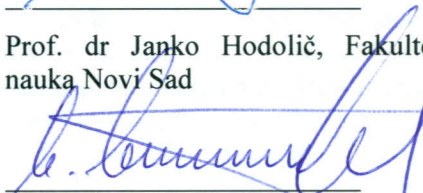
U zaključku se navodi da je razvijeni eksperimentalni sistem za ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću fizički realizovan, testiran i uveden u laboratorijsku primenu u okviru Laboratorije za kibernetiku i mehatronske sisteme, Centra za nove tehnologije, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Razvijena eksperimentalna instalacija, nastala kao rezultat samogradnje uz mali obim investicija, predstavlja prvu fazu razvoja eksperimentalne platforme ove vrste. Za dalja istraživanja planira se izgradnja savršenije varijante, eksperimentalni sistem EHR-MZ02, sa poboljšanim funkcionalnim performansama i konfiguracijom koja je bazirana na redundantnoj aktuaciji, u kojoj jedan motor ostvaruje funkciju pokretanja servoupravljanog zgloba (kao i kod konvencionalnih industrijskih robota), a drugi motor ima funkciju simultanog upravljanja krutošću – funkcionalno raspregnuti sistem.

MIŠLJENJE

Autori tehničkog rešenja: **Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću**, koji je razvijen (koncipiran, projektovan i proizveden samogradnjom) na projektu TR 35007, su jasno prikazali kompletnu strukturu i sadržaj tehničkog rešenja. Prikazane mogućnosti eksperimentalne instalacije, njenog hardvera i softvera, i potencijal za širok spektar razvojnih aktivnosti u oblasti istraživanja industrijskih humanoidnih robota. Polazeći o tehničke atraktivnosti, kompleksnosti i relevantnosti za aktuelna istraživanja u oblasti robotike, sa zadovoljstvom predlažemo Istraživačko-stručnom veću Mašinskog fakulteta u Beogradu da novrazvijenu opremu: **Sistem za eksperimentalno ispitivanje koncepta servo-upravljanog robotskog zgloba sa varijabilnom krutošću**, autora: prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš. i Ivan Danilov, dipl. inž. maš., prihvati kao novo tehničko rešenje, relevantno za unapredjivanje tehnoloških znanja Srbije u oblasti naprednih industrijskih tehnologija.



Prof. dr Janko Hodolić, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad



Prof. dr Miroslav Pilipović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beograd

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 102/2
ДАТУМ: 17.01.2013.


На основу захтева руководиоца пројекта проф.др Петра Петровића бр. 102/1 од 17.01.2013. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 17.01.2013. године, донело је следећу

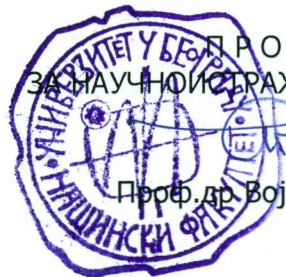
О Д Л У К У

Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у оквиру пројекта ТР 35007, под насловом: **„Систем за експериментално испитивање концепта серво-управљаног роботског зглоба са варијабилном крутошћу“**, чији су аутори: проф.др Петар Петровић, дипл.инж.маш. Никола Лукић и дипл.инж.маш. Иван Данилов, именују:

- проф.др Јанко Ходолич, ФТН Нови Сад и
- др Мирослав Пилиповић, ред.проф. у пензији.

Одлуку доставити: Министарству просвете, науке и технолошког развоја РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

ПРОДЕКАН
ЗА НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ

Проф.др. Војкан Лучанин



ИСТРАЖИВАЖКО-СТРУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ
Проф. др Војкан Лучанин
Продекан за научно-истраживачку делатност

Предмет: Предлог за избор рецензената техничког решења

Молим Истраживачко-стручно веће да за Техничко решење:

**СИСТЕМ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ КОНЦЕПТА СЕРВО-
УПРАВЉАНОГ РОБОТСКОГ ЗГЛОБА СА ВАРИЈАБИЛНОМ КРУТОШЋУ**

аутори:

1. Проф. др Петар Б. Петровић дипл. инж.
2. Никола Лукић дипл. инж., докторант
3. Иван Данилов дипл. инж., докторант

реализовано у оквиру пројекта ТР35007 који финансијски подржава Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије у периоду 2011. - 2014. године, именује два рецензента.

Наш предлог је да рецензију овог техничког решења обаве:

1. Проф. др Јанко Ходолич, Факултет техничких наука Нови Сад
2. Проф. др Мирослав Пилиповић, Машински факултет Универзитета у Београду

С поштовањем,

Проф. др Петар Б. Петровић
Руководилац пројекта ТР35007