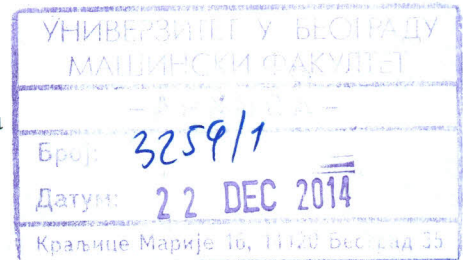


ИСТРАЖИВАЈКО-СТРУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ
Проф. др Војкан Лучанин
Продекан за научно-истраживачку делатност

Предмет: Предлог за избор рецензената техничког решења



Молим Научно-наставно веће да за Техничко решење:

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ ЗА
АДАПТИВНО УПРАВЉАЊЕ РЕДУНДАНТНИМ АНТРОПОМОРФНИМ
РОБОТОМ У ИЗВРШАВАЊУ ЗАДАТАКА СПАЈАЊА У ОКВИРУ СИСТЕМА
ЗА АУТОМАТСКУ МОНТАЖУ**

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 TR35007 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 Вељко Поткоњак, Електротехнички факултет Универзитета у Београду
2. Проф. др Александар Родић, Институт Михајло Пупин, Београд

С поштовањем,

Проф. др Петар Б. Петровић
Руководилац пројекта TR35007

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 3259/2
ДАТУМ: 26.12.2014.

На основу захтева др Петра Петровића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 3259/1 од 22.12.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 25.12.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења под насловом: **„ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ ЗА АДАПТИВНО УПРАВЉАЊЕ РЕДУНДАНТНИМ АНТРОПОМОРФНИМ РОБОТОМ У ИЗВРШАВАЊУ ЗАДАТАКА СПАЈАЊА У ОКВИРУ СИСТЕМА ЗА АУТОМАТСКУ МОНТАЖУ“**, чији су аутори: проф. др Петар Б. Петровић, Иван Данилов, дипл.инж.маш. и Никола Лукић, дипл.инж.маш. именују:

- проф. др Вељко Поткоњак, Универзитет у Београду Електротехнички факултет
- проф. др Александар Родић, Институт Михаило Пупин, Београд

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



Д Е К А Н
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА


Проф. др Милорад Милованчевић

Odlukom Naučno-nastavnog veća Mašinskog fakulteta u Beogradu br. 3259/1 od 22.12.2014. godine imenovani smo za recenzente tehničkog rešenja **Eksperimentalni sistem otvorene arhitekture za adaptivno upravljanje redundantnim antropomorfnim robotom u izvršavanju zadataka spajanja u okviru sistema za automatsku montažu**, 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: **Eksperimentalni sistem otvorene arhitekture za adaptivno upravljanje redundantnim antropomorfnim robotom u izvršavanju zadataka spajanja u okviru sistema za automatsku montažu**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš i Ivan Danilov, dipl. inž. maš., opisano je na 18 stranica A4 formata pisanih sa 12pt singl proreda, sadrži 8 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

Eksperimentalni sistem otvorene arhitekture za adaptivno upravljanje redundantnim antropomorfnim robotom u izvršavanju zadataka spajanja delova u okviru sistema za automatsku montažu, koji su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš i Ivan Danilov, dipl. inž. maš., rezultat je višegodišnjih razvojnih aktivnosti u oblasti tehnologije robotizovane montaže i posebno, teorije procesa spajanja i adaptivnog upravljanja procesom spajanja. Ovaj sistem je realizovan u okviru istraživačko-razvojnih aktivnosti na projektu TR 35007 sa ciljem **izgradnje eksperimentalne platforme za praktičnu proveru kritičnih teoretskih rezultata / hipoteza povezanih sa automatizacijom procesa spajanja primenom industrijskih robota i sistema adaptivnog upravljanja sa elementima veštačke inteligencije. Upravljački sistem otvorene arhitekture koji predstavlja osnovu ovog tehničkog rešenja omogućava pristup u realnom vremenu sistemskim funkcijama robota i na osnovu toga praktičnu implementaciju neograničenog spektra algoritama za adaptivno upravljanje ponašanjem robota i njegove interakcije sa okruženjem (sistem za montažu) u realnom vremenu. Ovo tehničko rešenje poseduje respektivnu istraživačku i tehnološku vrednost, a po svojim tehničkim performansama je jedinstveno u regionu.**

U prvom poglavlju se navode osnovna razmatranja o savremenim trendovima razvoja tehnologije robotizovane montaže i posebno, uticaja nove proizvodne paradigme masovne kastomizacije na nove istraživačke i razvojne zadatke koji su usmereni ka izgradnji nove generacije robotskih sistema, industrijskih humanoida, koji će posedovati visoka kognitivna svojstva koja će im omogućiti da efektivno funkcionišu u kontekstu ekstremno malih proizvodnih serija, ekstremno kratkog tržišnog veka proizvoda, ekstremna varijantnosti i takodje, da nesmetano mogu da rade sa čovekom na proizvodnim linijama uz punu fizičku i kognitivnu interakciju.

U drugom poglavlju definiše se suština istraživačke problematike u ovoj oblasti i identifikuju tri osnovna problema/zadatka/izazova: Problem 1 - Problem manipulativnih svojstava, odnosno problem mehanike robota optimalno prilagodjene klasi zadataka iz domena tehnologije montaže, Problem 2 - Problem senzorske interakcije sa okruženjem, prvenstveno vizuelna informacija i informacija o sili za klasu zadataka u kojoj robot ostvaruje fizičku interakciju sa okruženjem, Problem 3 - Problem obrade senzorskih informacija i kognitivni aspekti tog procesa, uključujući i svojstva inteligencije u svim fazama tog procesa.

U trećem poglavlju se daje kratak opis stanja tehnike u tehnologije robotizovane montaže i sa tim u vezi preopoznaje da zatvorenost upravljačkog sistema i softverska arhitektura komercijalno raspoloživih industrijskih robota predstavlja jedno od najznačajnijih ograničenja za ekspanziju istraživačkih aktivnosti u ovoj oblasti koje su usmerene ka industrijskoj praksi, a zatim i ka konkretnim aplikativnim potrebama u industriju.

U četvrtom poglavlju se opisuje koncept i daje kratak opis fizičke strukture tehničkog rešenja.

U okviru petog poglavlja navodi se detaljan opis hardvera i softvera razvijenog rešenja. Tehničko rešenje sastoji se iz sledećih podsistema: 1) Redundantni antropomorfni robot Yaskawa SIA 10F, nosivosti 10 kg i dohvata 720mm, 2) Upravljački sistem robota Yaskawa FS100 sa ekstremno brzim povratnim spregama (1ms), 3) PC radna stanica sa Yaskawa MotoPlus SDK razvojnim sistemom i nadređenim upravljačkim sistemom za interakciju sa upravljačkim sistemom robota u realnom vremenu i interfejsom ka hardverskim u/i kanalima upravljačkog sistema robota, 4) Senzor sile sa pratećim sistemom za kondicioniranje signala i interfejsom ka PC radnoj stanici i 5) Prateći mehanički i senzorski hardver/softver za eksperimente cilindričnog spajanja i eksperimente upravljanja popustljivošću vrha robota. U okviru četiri podpoglavlja: 1) MotoPlus razvojni sistem, 2) MotoPlus SDK biblioteka, 3) MotoPlus SDK integracija i 4) Primeri opisuju se detaljno tehničke osnove na kojima se zasniva tehničko rešenje. Funkcionalnost tehničkog rešenja ilustruje se kroz odgovarajući primer praktične primene. Robot Yaskawa SIA 10F je nabavljen kao kapitalna oprema od strane resornog ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u okviru projekta TR35007.

U zaključku se navodi da je tehničko rešenje fizički realizovano, testirano i uvedeno 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 vrlo mali obim investicija, predstavlja potentnu platformu za dalji razvoj i istraživanja u oblasti tehnologije robotizovane montaže, ali i za mnoge druge primene u oblasti industrijske robotike i industrijskih tehnologija.

MIŠLJENJE

Autori tehničkog rešenja **Eksperimentalni sistem otvorene arhitekture za adaptivno upravljanje redundantnim antropomorfnim robotom u izvršavanju zadataka spajanja u okviru sistema za automatsku montažu**, koji je razvijen (koncipiran, projektovan i realizovan samogradnjom) na projektu TR 35007, precizno i kompletno su prikazali strukturu, sadržaj i upotrebnu vrednost tehničkog rešenja. Na osnovu tehničkih performansi i inovativnih sadržaja konstatujemo da ovo tehničko rešenje predstavlja naučni i stručni doprinos u oblasti tehnologije robotske montaže, robotike i mehatronike. U som smislu, sa zadovoljstvom predlažemo Naučno-nastavnom veću Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu da novorazvijeni eksperimentalni sistem: **Eksperimentalni sistem otvorene arhitekture za adaptivno upravljanje redundantnim antropomorfnim robotom u izvršavanju zadataka spajanja u okviru sistema za automatsku montažu**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš i Ivan Danilov, dipl. inž. maš., prihvati kao novo tehničko rešenje, relevantno za korpus tehnoloških znanja Srbije u oblasti novih proizvodnih tehnologija, mehatronike i robotike.

Beograd, 12.01.2015. godine



Prof. dr Veljko Potkonjak, Elektrotehnički fakultet
Univerziteta u Beogradu



Dr Aleksandar Rodić, Institut Mihajlo Pupin, Beograd

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 3259/3
ДАТУМ: 26.12.2014.

На основу захтева др Петра Петровића, редовног професора Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 3259/1 од 22.12.2014. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 25.12.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење под насловом: „ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ СИСТЕМ ОТВОРЕНЕ АРХИТЕКТУРЕ ЗА АДАПТИВНО УПРАВЉАЊЕ РЕДУНДАНТНИМ АНТРОПОМОРФНИМ РОБОТОМ У ИЗВРШАВАЊУ ЗАДАТАКА СПАЈАЊА У ОКВИРУ СИСТЕМА ЗА АУТОМАТСКУ МОНТАЖУ“, чији су аутори: проф. др Петар Б. Петровић, Никола Лукић, дипл.инж.маш. и Иван Данилов, дипл.инж.маш.

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



ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф. др Милорад Милованчевић

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 2014-03

**EKSPERIMENTALNI SISTEM OTVORENE
ARHITEKTURE ZA ADAPTIVNO
UPRAVLJANJE REDUNDANTNIM
ANTROPOMORFNIM ROBOTOM U
IZVRŠAVANJU ZADATAKA SPAJANJA U
OKVIRU SISTEMA ZA AUTOMATSKU
MONTAŽU**

Beograd, januar 2015.

Specifikacija tehničkog rešenja u skladu sa Pravilnikom za vrednovanje rezultata istraživanja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije:

Vrsta tehničkog rešenja	Laboratorijski prototip (M85)
Autori tehničkog rešenja	Prof. dr Petar B. Petrović, Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Ivan Danilov, dipl. inž. maš.
Naziv tehničkog rešenja	Eksperimentalni sistem otvorene arhitekture za adaptivno upravljanje redundantnim antropomorfnim robotom u izvršavanju zadataka spajanja u okviru sistema za automatsku montažu
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	2014.
Verifikacija rezultata	Od strane recenzenata: Prof. dr Veljko Potkonjak, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu Dr Aleksandar Rodić, Institut Mihajlo Pupin, Beograd
Ko je prihvatio tehničko rešenje	Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Primena rezultata	Laboratorija za Kibernetiku i mehatronske sisteme, Centra za nove tehnologije - CeNT, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

1. OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Ovo tehničko rešenje je fokusirano na prostor preseka između tehnologije montaže i tehnologije industrijskih robota. Konvergencija ove dve tehnologije je predmet izučavanja u oblasti proizvodnih tehnologija koji ima drugu vremensku osu i seže u rane faze industrijske robotike, u šezdesete godine dvadesetog veka. Primena robota u procesu montaže (ovde se isključivo misli na industrijsku montažu, odnosno montažu industrijskih proizvoda i fabrici kao prostoru u kojem se fizički odvija ovaj proces) je prirodna razvojna ekstenzija tehnologije manuelne montaže. Robot je veštački tehnološki ekvivalent manuelnog radnika, montera. Ova analogija je očigledna, ali sa aspekta tehnologije i tehnike nije tako lako ostvariva. Osnovni razlog je inherentna kompleksnost tehnologije montaže. Ovakva argumentacija se lako dokazuje ukoliko se naprave poredjenja sa drugim tehnološkim procesima, poput izrade sastavnih delova ili dimenzione kontrole. Ovi procesi su u potpunosti automatizovani i dugi niz godina, praktično od osamdesetih godina dvadesetog veka, u industrijskoj praksi egzistiraju i uspešno se primenjuju potpuno automatizovani tehnološki entiteti poput obradnog centra za glodanje ili struganje ili koordinatna merna mašina. Takav tehnološki entitet jednostavno ne postoji u tehnologiji montaže. Neophodna su dalja i vrlo intenzivna istraživanja kako bi se konačno približili manuelnom radniku, monteru, njegovim motoričkim, a pre svega kognitivnim performansama i rezultate tih aktivnosti ugradili u veštačkog ekvivalenta, robota za montažu. Ovo tehničko rešenje je rezultat napora koji se čine dugi niz godina na Katedri za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Aktuelna istraživanja su usmerana na domen redundantnih antropomorfnih robota i sistema upravljanja otvorene arhitekture, sa povratnom spregom po sili i složenim algoritmima za obradu senzorske informacije i prepoznavanje kontaktnih situacija u realnom vremenu. Ova istraživanja se sprovode u okviru Laboratorije za kibernetiku i mehatronske sisteme – *CyberManufacturing Systems Laboratory* - CMSysLab

2. TEHNIČKI PROBLEM

Uspešna primena robota u izvršavanju generičkih zadataka tehnologije montaže je povezana sa tri grupe tehničkih problema:

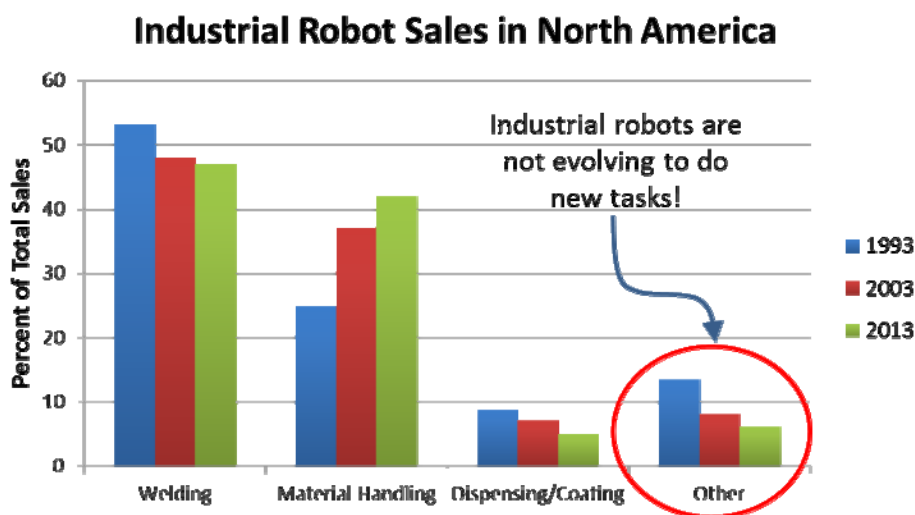
- Problem 1 - Problem manipulativnih svojstava, odnosno problem mehanike robota optimalno prilagodjene klasi zadataka iz domena tehnologije montaže,
- Problem 2 - Problem senzorske interakcije sa okruženjem, prvenstveno vizuelna informacija i informacija o sili za klasu zadataka u kojoj robot ostvaruje fizičku interakciju sa okruženjem,
- Problem 3 - Problem obrade senzorskih informacija i kognitivni aspekti tog procesa, uključujući i svojstva inteligencije u svim fazama tog procesa.

Sa prethodnim u vezi, industrijski roboti kakvi danas dominiraju komercijalnim prostorom i industrijskom praksom, u svakoj od prethodno navedene 3 klase imaju čitav niz ograničenja. Jedno od ograničenja je vezano za sistem upravljanja robotom. Tipičan industrijski robot je robot zatvorenog sistema upravljanja koji korisniku ostavlja minimalni prostor za interakciju sa robotom i njegovu specijalizaciju za izvršavanje konkretnog zadatka. Ta zatvorenost ograničava mogućnost ugradnje različitih senzorskih sistema za interakciju sa radnim okruženjem, iz čega dalje sledi nepremostivo ograničenje za impelmentaciju različitih naprednih algoritama za aktivno upravljanje specifičnom interakcijom robota sa okruženjem i algoritama koji u sebi poseduju i neke od kognitivnih sadržaja, neophodnih za ostvarivanje viših stepena autonomije.

Drugo ograničenje je vezano za mehanički sistem i kinematsku konfiguraciju robota. Ljudska ruka, koja je bez premca najsofisticiraniji nama poznat mehanički sistem za montažu, je visokoredundantna kinematska struktura. Kinematska redundansa tu nije bez razloga. Priroda nije bez razloga načinila ovakav izbor u evolutivnom optimizacionom procesu. Kinematska redundansa je esencijalno svojstvo za simultano i nekonfliktno izvođenje većeg broja primitivnih zadataka bez kojih nije moguća uspešna primena robota u tehnologiji montaže. Prvi zadatak je trivijalan, to je upravljanje kretanja vrha robota (pozicija i orijentacija / *motion control*). Drugi zadatak je upravljanje ograničenog (kolizionog) kretanja koje je inherentno svakom procesu spajanja delova. Koliziono kretanje je nemoguće upravljati bez upravljanja popustljivošću vrha robota. Dakle, drugi zadatak, odnosno prvi među sekundarnim zadacima je upravljanje popustljivošću robota (*compliance control*). Neredundantna kinematska struktura ne može da obezbedi simultanu i nekonfliktnu realizaciju ova dva zadatka. Bez namere da se ulazi u dalju detaljnu analizu, ovde se kao suštinski bitan navodi i treći upravljački zadatak, a to je zadatak izbegavanja singulariteta (*singularity avoidance*), koji je kod redundantnih kinematskih konfiguracija izraženiji nego kod neredundantnih. Kinematsku redundansu ovde treba posmatrati i kroz okvir bimanuelnih konfiguracija, koje zbog ekstremne redundanse poseduju vrlo veliki kapacitet za realizaciju niza sekundarnih zadataka i zato se istraživanja u oblasti robotske montaže postepeno usmeravaju u ovom pravcu, ka bimanualnim humanoidnim robotima.

3. STANJE TEHNIKE

Manuelna montaža je još uvek dominantan oblik montaže. Robotska montaža je prisutna u srednjeseerijskoj proizvodnji (na primer, proizvodnja automobila, ili proizvodnja jedne široke klase malih proizvoda široke potrošnje, uključujući i oblast elektronike). Primena robota u ovom kontekstu po svojim osnovnim odlikama bliža je konceptu krute montaže nego konceptu manuelne montaže (preciznost a ne adaptivnost).



Slika 1: IFR statistički podaci primene robota za tržište SAD u periodu od 1993. do 2013. godine.

In 2013, the sales of industrial robots in North America were strong, but the diversity of robot tasking remained utterly STAGNANT. For more than 20 years, industrial robots have been limited to roughly the same set of tasks – welding, material handling and dispensing – because robots are cost-effective for repetitive and high volume tasks but are not cost-effective for lower volume mixed part production. Yet over the same 20 years, governments and research institutions have spent more than \$1 billion on robotics research to enhance robot behaviors, such as those for acting on complex perception data, moving about on mobile platforms and collaborating with humans. This research investment is largely languishing in labs in part because the limited software architectures of current industrial robots present a barrier to the transition of research products. As a result, it simply costs too much to apply these advanced capabilities to improve industrial productivity. Robots are flexible enough to accomplish a wide variety of automation tasks, but until the return on investment to integrate and program robots for agile processing becomes attractive, robots will continue to be deployed in only limited applications, and opportunities for greater productivity will be lost.

Nova proizvodna paradigma kastomizovane/personalizovane proizvodnje drastično redukuje obim serija (maloserijska proizvodnja sa jasnim trendom ka pojedinačnoj), drastično povećava varijantnost proizvoda i drastično smanjuje tržišni vek proizvoda. U ovakvom kontekstu, robot za montažu mora da se tehnološki transformiše i po svojim performansama bitno približi performansama manuelnog radnika i takodje, da omogući blisku fizičku i kognitivnu interakciju sa manuelnim radnikom. Postojeća tehnologija industrijskih robota ne može da odgovori ovom zahtevu. Razlozi su navedeni u prethodnom poglavlju. Oni se mogu argumentovati i egzaktnim statističkim podacima koji se navode na slici 1. Statistika prodaje robota na tržištu SAD (izvorišna tačka industrijske robotike) je praktično nepromenjena u poslednjih 20 godina, jer jasno dominiraju tri grupe aplikacija. Jedan širok spektar industrijske primene, svrstan grupno pod oznakom ostalo, čak beleži stagnaciju. Ovakvo stanje se može objasniti i širim aspektima, netehničke prirode (migracija proizvodnje iz SAD / *off-shoring* i *outsourcing* proces), ali sasvim sigurno, evidentan zastoj jednim svojim delom može da se poveže i sa tehničkim aspektima.

Upravljački sistem i softverska arhitektura komercijalno raspoloživih industrijskih robota su potpuno zatvoreni i sa vrlo malim izborom funkcionalnosti, i to je jedno od najznačajnijih ograničenja za ekspanziju istraživačkih aktivnosti usmerenih ka industrijskoj praksi, a zatim i za konkretne aplikativne potrebe. Zato su razvojne aktivnosti koje se odnose na različite hardverske i softverske aspekte sprege industrijskih robota i senzorskog podsistema, a takodje i efikasnih algoritama za obradu senzorskih signala, prepoznavanja i odlučivanja u realnom vremenu od suštinskog značaja. U okviru ovog tehničkog rešenja koncipirana je i fizički realizovana robotska istraživačka platforma otvorene arhitekture, sa kinematski redundantnim robotom antropomorfne konfiguracije.

4. KONCEPT TEHNIČKOG REŠENJA

Eksperimentalni laboratorijski sistem koji je predmet ovog tehničkog rešenja sastoji se iz sledećih podsistema: 1)Redundantni antropomorfni robot Yaskawa SIA 10F, nosivosti 10 kg i dohvata 720mm, 2)Upravljački sistem robota Yaskawa FS100 sa ekstremno brzim povratnim spregama (1ms), 3)PC radna stanica sa Yaskawa MotoPlus SDK razvojnim sistemom i nadređenim upravljačkim sistemom za interakciju sa upravljačkim sistemom robota u realnom vremenu i interfejsom ka hardverskim u/i kanalima upravljačkog sistema robota, 4)Senzor sile sa pratećim sistemom za kondicioniranje signala i interfejsom ka PC radnoj stanici i 5)Prateći mehanički i senzorski hardver/softver za eksperimente cilindričnog spajanja i eksperimente upravljanja popustljivošću vrha robota. Ovakva hardversko/softverska arhitektura je otvorena i ka ROS (*Robot Operating System*) biblioteci razvojnih i aplikativnih alata. Detalji fizičke realizacije eksperimentalnog robotskog sistema su prikazani na slici 2.

Robot Yaskawa SIA 10F je nabavljen kao kapitalna oprema od strane resornog ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u okviru projekta TR35007.

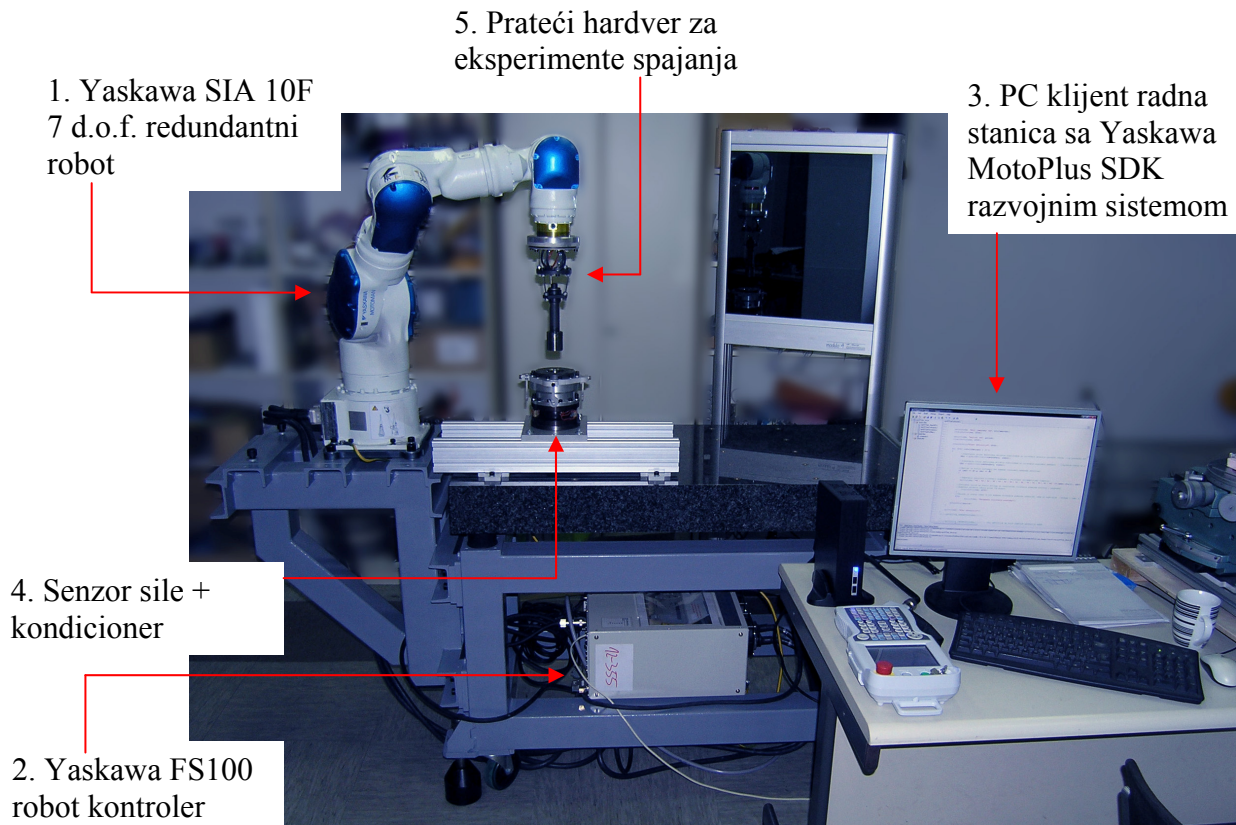
5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Zbog svoje tehničke razudjenosti i obimnosti, detaljan opis ovog tehničkog rešenja usmeren je dominantno ka MotoPlus modulu kao ključnoj komponenti za ostvarivanje otvorenosti kompletne robotske eksperimentalne platforme.

5.1 MotoPlus razvojni sistem

Kompanija Yakawa je razvila MotoPlus (*Motoman Professional Programming Language for Superior Use*) SDK sistem i učinila ga komercijalno dostupnim tokom 2013. godine, sa ciljem da odgovori na ekspanzionalno rastuće potrebe tržišta i istraživačkih laboratorija za razvojem takozvanih naprednih aplikacija, odnosno novih industrijskih primena robota koje

izlaze izvan uobičajenih okvira, pre svega u smislu adaptivnog ponašanja robota u izvršavanju radnih zadataka i njegove intenzivne interakcije sa radnim okruženjem. Dakle, sa aspekta upravljanja robotom, fokus nije na upravljanju robotskim mehanizmom, već na upravljanju interakcije robota sa okruženjem. Ovim se suštinski menja uloga upravljačkog sistema, i težište zadatka prenosi u mnogo kompleksniji prostor, ne samo sa aspekta kompleksnosti upravljačkog zadatka, već i sa aspekta njegove varijantnosti i izražene potrebe za komunikaciju u realnom vremenu sa drugim digitalnim sistemima, pre svega sa jednim vrlo širokim spektrom senzora. Otvorenost upravljačkog sistema je u ovako izmenjenom kontekstu imperativ.



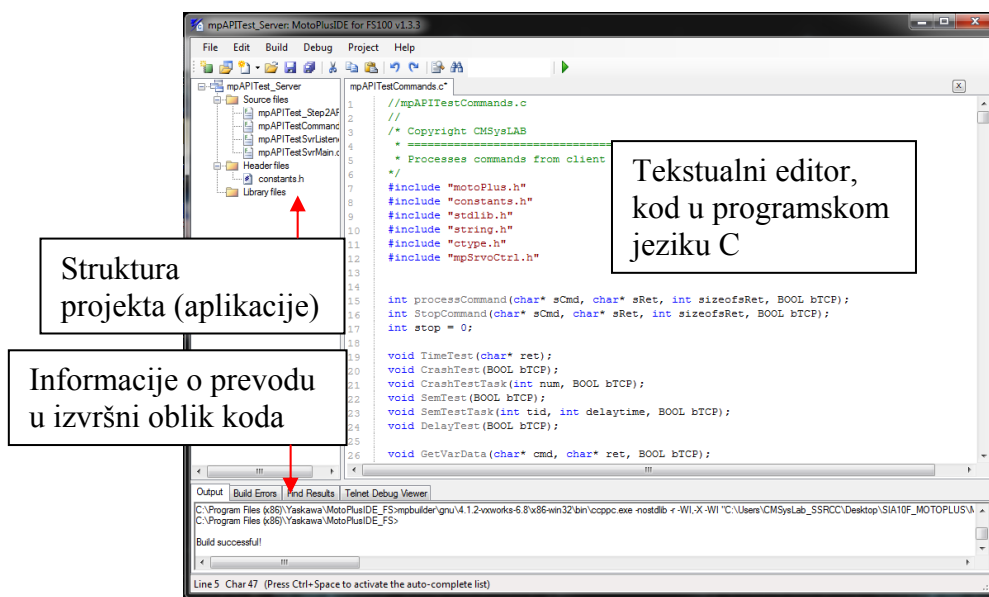
Slika 2: *Robotski sistem otvorene arhitekture za laboratorijsko eksperimentisanje u oblasti tehnologije montaže.*

U osnovi, MotoPlus SDK je specijalizovani softverski sistem/okruženje, koje omogućava da se na regularan i pouzdan način pristupi baznim funkcijama upravljačkog sistema robota, njegovim sistemskim registrima i sistemskim parametrima, i da se na njih utiče u realnom vremenu. Na bazi ove funkcionalnosti, moguć je razvoj i implementacija različitih upravljačkih algoritama. U okviru MotoPlus SDK razvojnog sistema ovi algoritmi se kodiraju u C jeziku, prevode i u izvršnom obliku, off-line prenose na upravljački sistem robota. U radnom modu, CPU upravljačkog sistema robota izvršava ove algoritme simultano sa osnovnim zadatkom koji je programiran kroz konvencionalni sistem za razvoj aplikacija. Ovakva vrsta interakcije programera i upravljačkog sistema robota kroz konvencionalni sistem za razvoj aplikacija, namenjen 'običnom' korisniku, nije moguća. Upravljački sistem FS100 i MotoPlus SDK kao njegova nadogradnja, čine funkcionalno komplementarnu i kompletnu hardversko-softversku platformu koja je u razvojno-aplikativnom smislu u potpunosti otvorena. Izgled MotoPlus SDK korisničkog interfejsa prikazana je na slici 3.

Sa aspekta osnovne arhitekture, MotoPlus SDK se instalira na PC računaru, a veza sa upravljačkim sistemom robota F100 se ostvaruje preko Ethernet LAN mrežnog adaptera.

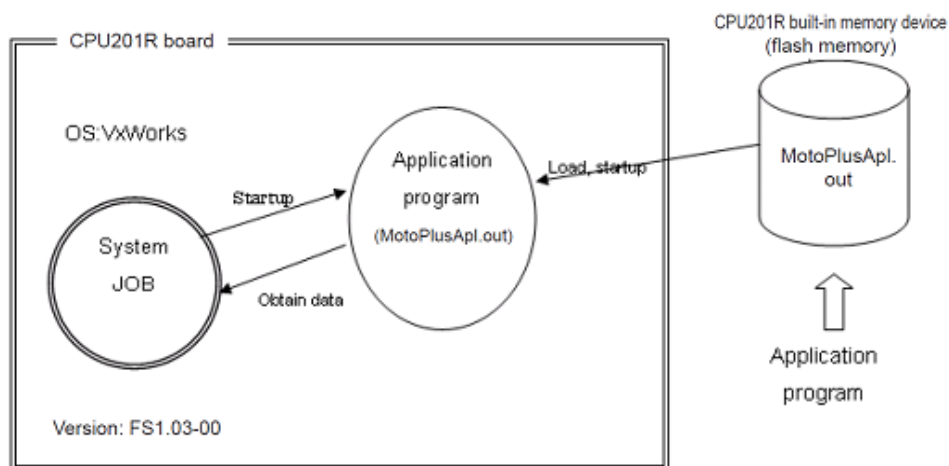
Ovakva arhitektura je moguća jer je FS100 upravljački sistem baziran na IBM PC kompatibilnoj hardverskoj platformi i VxWORKS RTOS, operativnim sistemom specijalizovanim za primene koje zahtevaju rad u realnom vremenu. FS100 u ovom kontekstu ima funkciju servera koji ostvaruje dvosmernu komunikaciju sa klijentskom strukturom, koju čine: 1) Lokalni računari na kojima se ostvaruje upravljačka ili nadzorna funkcija, 2) Inteligentni senzorski i akcioni sistemi i 3) Interfejs moduli za pristup Internetu.

Jezgro MotoPlus SDK razvojnog sistema čini biblioteka C rutina, koje su kompatibilne sa hardverskom i softverskom platformom FS100 upravljačkog sistema robota. Za kodiranje nekog konkretnog upravljačkog algoritma, odnosno neke konkretne aplikacije koja izlazi izvan okvira koji se kodiraju konvencionalnim razvojnim sistemom, pored MotoPlus SDK biblioteka koriste se i standardne biblioteke C programskog jezika koje su sadržane u MotoPlus SDK razvojnom sistemu.



Slika 3: MotoPlus korisnički interfejs sa editorom za razvoj aplikacije u programskom jeziku C.

Za razvoj aplikacije MotoPlus SDK poseduje odgovarajući razvojni interfejs. Ovaj razvojni interfejs, jedan od korisničkih ekrana je prikazan na slici 3, sadrži širok spektar off-line razvojnih alata, ali ne i alate za komunikaciju sa FS100 VxWORKS RTOS serverom.



Slika 4: Arhitektura MotoPlus SDK razvojnog sistema: Funkcionalne sprege modula upravljačkog sistema otvorene arhitekture bazirane na MotoPlus aplikaciji i VxWorks operativnog sistema na FS100 upravljačkoj jedinici robota Yaskawa SIA10F.

Komunikacija sa FS100 VxWORKS RTOS serverom ostvaruje se preko specijalnih korisničkih aplikacija sa strane klijenta, koje se razvijaju nezavisno od MotoPlus SDK sistema, ali koje su u funkcionalnom smislu kompatibilne sa konkretnom aplikacijom koja je razvijena u MotoPlus SDK razvojnom sistemu, instalirana na FS100 VxWORKS RTOS serveru, i inkorporirana u izvršnom kodu u zadatak koji se izvršava na FS100 CPU. Na slici 4 je prikazana arhitektura otvorenog razvojnog i upravljačkog sistema FS100 VxWORKS RTOS i MotoPlus SDK.

Pored prethodno navedenih relacija, na slici 4 uočavaju se dve osnovne softverske celine unutar upravljačkog sistema robota, koje se izvršavaju u realnom vremenu:

- **JOB Task** - radni zadatak robota generisan direktnim programiranjem, obučavanjem pomoću uređaja za programiranje, ili generisan automatski, korišćenjem konvencionalnog interfejsa za programiranje aplikacije, čije izvršavanje može biti uslovljeno ili korigovano preko algoritama koji su razvijeni i implementirani kao MotoPlus application task, i
- **Application Task** – dopunski radni zadatak, razvijen kroz MotoPlus razvojni sistem, koji u realnom vremenu ostvaruje interakciju sa radnim zadatkom definisanim kroz JOB task, a takodje i sa okruženjem robota kroz Ethernet ili druge interfejse kojima je u hardverskom smislu opremljen FS100 upravljački sistem robota, a koji su pod kontrolom VxWORKS operativnog sistema.

U ovako definisanom kontekstu moguće je razumeti način na koji je ostvarena otvorenost FS100 upravljačkog sistema. MotoPlus Application Task je poseban sloj, hijerarhijski iznad JOB Task baznog izvršnog sloja kojim se direktno upravlja kretanje robota, odnosno slaganje kretanja po pojedinim servo osama i čitanje njihovih enkodera i tahnogeneratora. Specijalizovane rutine MotoPlus biblioteke omogućavaju da se utiče na izvršenje JOB Task u realnom vremenu, što stvara praktično neograničen prostor za razvoj različitih adaptivnih algoritama za interakciju robota sa svojim okruženjem u realnom vremenu.

Istovremeno izvršavanje više zadatka (*multitasking*) je jedna od najvažnijih funkcionalnosti FS100 VxWORKS sistema upravljanja. Ovakav način izvršavanja zadataka moguće je ostvariti primenom MotoPlus razvojnih biblioteka. Na primer, FS100 može da istovremeno izvršava: 1)programirani radni zadatak (upravljanje servo osama robota / slaganje kretanja u okviru JOB Task), 2)očitavanje senzorskih informacija i 3)slanje parametara putem Ethernet serverske strukture ka PC klijentu.

5.2 MotoPlus SDK biblioteka

Prema funkcijama za koje su namenjene, MotoPlus SDK biblioteka je podeljena na sledeće grupe rutina kojima se ostvaruju određene klase funkcija:

1. Funkcije kontrole toka izvršenja MotoPlus aplikacije (kreiranje, pokretanje i pauziranje zadatka; generisanje, primanje i slanje internih informacija; vremenska kontrola izvršenja zadatka, ...)

Primer: **mpTaskDelay** - odlaganje/pauziranje izvršenja algoritma

Sintaksa: STATUS mpTaskDelay (int ticks)

Parametar: ticks (broj inkremenata pauze)

Opis: Funkcija **mpTaskDelay** se koristi za odlaganje / pauziranje izvršenja programiranog algoritma za željeni vremenski period koji zavisi od broja inkremenata. Fiksni period jednog inkrementa je 1 milisekund.

2. Funkcije komunikacionog tipa. U ovu grupu funkcija svrstava se više različitih vidova komunikacije sa eksternim digitalnim modulima (PC, mikrokontroleri, senzori), kao što su: Ethernet, RS232, i digitalni ulazi/izlazi. Napomena: FS100 upravljačka jedinica sa modulom za ručno upravljanje i programiranje komunicira putem Ethernet-a (TCP/IP), tako da se ovaj uređaj u kompletnom sistemu tretira kao jedan od klijenata u lokalnoj mreži FS100 VxWORKS operativnog sistema.

Primer: **mpSocket** - Pokretanje porta za Ethernet komunikaciju

Sintaksa: LONG **mpSocket**(LONG domain, LONG type, LONG protocol);

Parametri: domain (vrsta protokola, može se definisati IPv4 internet protocol); type (tip komunikacije; može se definisati: TCP ili UDP); protocol (definisanje broja protokola)

Opis: Funkcija **mpSocket** koristi se za pokretanje porta za Ethernet komunikaciju u okviru FS100 Vx WORKS operativnog sistema, i neophodna je za kreiranje TCP ili UDP konekcije u serverskoj strukturi.

3. Funkcije upravljanja robotom. Ova grupa funkcija se dodatno deli u dve podgrupe:

- a. Funkcije čitanja i praćenja stanja robota: čitanje stanja promenljivih u sistemskim memorijskim registrima, čitanje stanja digitalnih u/i kanala, čitanje stanja alarma, mod rada, čitanje senzorskih informacija sa aktuatora (motor / regulator) robota (moment, pozicija, brzina), čitanje informacija o programiranom radnom zadatku robota;
- b. Funkcije upravljanja robotom i pratećim hardverskim resursima: upisivanje promenljivih u memoriju, promena stanja digitalnih u/i kanala, kontrola alarma, kontrola radnih zadataka robota (pozivanje, pokretanje, brisanje), zadavanje kretanja robota nezavisno od programiranih radnih zadataka (inkrementalno i kontinualno kretanje u prostoru radnog zadatka robota (X, Y, Z, R_x, R_y, R_z); inkrementalno i kontinualno kretanje u konfiguracionom prostoru robota (generalisane koordinate: q_1 do q_7)).

Primer: **mpMOVL** - zadavanje komande za linearno kretanje vrha robota

Sintaksa: LONG **mpMOVL** (MP_MOVL_SEND_DATA* sData, MP_STD_RSP_DATA* rData);

Parametri: sData (grupa parametara kojom se definišu: koordinatni sistem, brzina kretanja, vrednost prirasta koordinata u odnosu na trenutnu poziciju); rData (memorijska lokacija/promenljiva u koju se smeštaju podaci o statusu izvršenja komande)

Opis: Funkcija **mpMOVL** koristi se za zadavanje komandi za linearno kretanje vrha robota kada je robot u pasivnom stanju (održava aktuelnu poziciju i orijentaciju vrha bez izvršavanja programiranog radnog zadatka)

4. Funkcije povezivanja i sinhronizacije radnog zadatka robota (JOB task) i specifične MotoPlus aplikacije (Application task). Ove funkcije omogućavaju razmenu podataka na relaciji prethodno dve navedene celine, i korekciju programirane putanje i brzine nominalnog radnog zadatka u realnom vremenu.

Primer: **mpMeiPutCorrPath** - Korekcija nominalne trajektorije vrha robota

Sintaksa: `int mpMeiPutCorrPath (int sl_id,
MP_POS_DATA *src_p);`

Parametri: `sl_id` (identifikacioni broj za razmenu podataka na relaciji JOB Task - Application task); `src_p` (grupa parametara kojom se definiše: 1) koordinatni sistem u kome se izvršava korekcija nominalne putanje vrha robota, i 2) vrednost prirasta koordinata u odnosu na nominalnu/aktuelnu putanju vrha robota)

Opis: Funkcija **mpMeiPutCorrPath** koristi se korekciju nominalne/programirane putanje vrha robota na osnovu definisanih parametara u realnom vremenu

5. Funkcije namenjene za nadzor i upravljanje eksternim servo modulima (na primer: hvataljka, obrtna ili translatorna servo osa, ...). Ove funkcije omogućavaju čitanje vrednosti brzine i momenta, kao i upravljanje eksternim servo modulima, uključujući funkciju ograničenja momenta motora. Napomena: upravljački sistem FS100 u osnovnoj konfiguraciji je ograničen na implementaciju samo jednog eksternog servo modula.

Primer: **mpSvsGetVelTrqFb** - Očitavanje vrednosti brzine i momenta

Sintaksa: `int mpSvsGetVelTrqFb(MP_GRP_AXES_T dst_vel,
MP_TRQ_CTL_VAL *dst_trq)`

Parametri: `dst_vel` (memorijska lokacija za upisivanje očitanih podataka brzine); `dst_trq` (memorijska lokacija za upisivanje očitanih podataka momenta)

Opis: Funkcija **mpSvsGetVelTrqFb** koristi se za očitavanje vrednosti momenta i brzine kretanja eksterne servo ose sa ciljem upravljanja u povratnoj sprezi sinhronizovano sa robotskom rukom SIA10F.

6. Funkcije manipulacije datotekama i memorijskim prostorom upravljačkog sistema FS100 (kreiranje, uklanjanje, preimenovanje i izmene sadržaja datoteka; manipulacija postojećim datotekama; zaključavanje i alociranje memorijskog prostora, itd.)

Primer: **mpCreate** - Kreiranje datoteke

Sintaksa: `int mpCreate (const char* name, int flags);`

Parametri: `name` (definisane naziva datoteke); `flags` (definisane mogućnosti naknadnog pristupa kreiranoj datoteci: samo čitanje, samo upisivanje, i čitanje i upisivanje);

Opis: Funkcija **mpCreate** koristi se za kreiranje nove datoteke direktno u memorijskom prostoru FS100 upravljačkog sistema (Vx WORKS operativni sistem). Datoteka se može koristiti za upisivanje i naknadno čitanje parametara /podataka tokom rada MotoPlus aplikacije.

7. Funkcije kinematskih transformacija, uključujući konverziju koordinata i manipulaciju koordinatnim sistemima definisanim u radnom okruženju robota (izračunavanje

direktne i inverzne kinematske transformacije; konverzija uglovnih vrednosti servo osa robota u impulse i obrnuto; kreiranje, rotacija i množenje homogenih transformacionih matrica; operacije vektorskog i skalarnog množenja).

Primer: **mpConvPulseToAngle** - Konverzija generalisanih koordinata robota

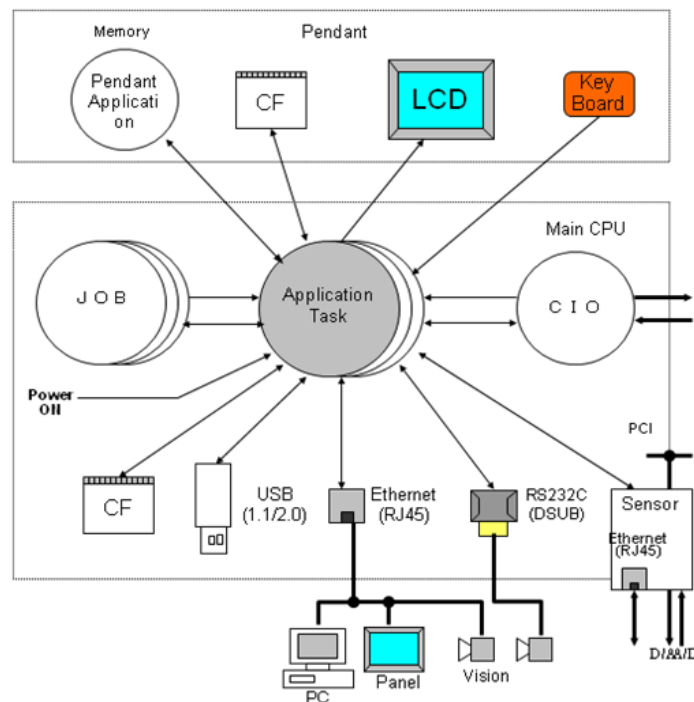
Sintaksa: `int mpConvPulseToAngle (unsigned int grp_no, long pulse[MP_GRP_AXES_NUM], long angle[MP_GRP_AXES_NUM]);`

Parametri: `grp_no` (promenljiva kojoj je dodeljen koordinatni sistem robota SIA10F); `pulse` (memorijska lokacija na koju je prethodno upisana informacija o broju enkoderskih impulsa za svaki od zglobova robota); `angle` (memorijska lokacija na koju će biti smeštena informacija o uglovnim vrednostima pozicije zglobova robota nakon konverzije)

Opis: Funkcija **mpConvPulseToAngle** koristi se za konverziju generalisanih (unutrašnjih) koordinata robota iz broja enkoderskih impulsa u uglovne vrednosti

5.3 MotoPlus SDK integracija

Uzimajući u obzir prethodno navedene funkcionalnosti MotoPlus SDK biblioteke, MotoPlus SDK razvojni sistem, FS100 upravljački sistem i robotska ruka SIA 10F se mogu posmatrati kao otvorena eksperimentalna platforma za istraživanje u oblasti proizvodnih tehnologija, posebno tehnologije robotske montaže, sa skupom kompleksnih i tehnološki visokovrednih razvojnih alata koji omogućava praktično neograničenu slobodu eksperimentisanja. Integracija MotoPlus SDK sistema u hardversku i funkcionalnu strukturu ove razvojne platforme navedena je na slici 5).



Slika 5: Generalna struktura robotske istraživačko-razvojne platforme otvorene arhitekture razvijene u okviru projekta TR35007 i implementirane u Laboratoriji za kibernetiku i mehatronske sieme, CMSysLab, Mašinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu.

Prateći arhitekturu prikazanu na slici 5 i imajući u vidu prethodno navedene funkcije/biblioteke, razvijeni eksperimentalni robotski sistem otvorene arhitekture može da ostvari sledeće karakteristične modove rada:

- Mod 1:** Rad sa MotoPlus SDK aplikacijom koja funkcioniše kao nezavisna celina
- Praćenje i dokumentovanje stanja sistema (robota) tokom rada - tokom izvršavanja radnih zadatak,
 - Emuliranje programiranog radnog zadatka robota unutar MotoPlus aplikacije, i
 - Upravljanje robotom na osnovu stanja sistem (npr. informacije očitane iz zglobova robota ili sa digitalnih U/I uslovljavaju kretanje robota).
- Mod 2:** Rad sa MotoPlus SKD aplikacijom koja je povezana i sinhronizovana sa programiranim radnim zadatkom robota i u zavisnosti od programiranih parametara, i očitanih informacija stanja sistema, pokreće, uslovljava, koriguje i/ili prekida njegovo izvršenje.
- Mod 3:** Rad sa MotoPlus SDK aplikacijom koja izvršava funkciju integracije robota sa eksternim sensorima ili modulima (PC, PLC, MCU), pri čemu se komunikacija izvršava putem raspoloživih komunikacionih resursa i na taj način kontroliše rad robota odnosno izvršenje programa.
- Mod 4:** Rad sa MotoPlus aplikacijom koja se integriše sa eksternim modulima (PC, PLC, MCU), pri čemu se deo upravljačkih funkcija i odluka ostavlja na raspolaganje čoveku, koji na ovaj način ima mogućnost direktnog pristupa aplikaciji (upravljačkom sistemu robota) u realnom vremenu, uključujući funkciju nadzora i mogućnost promene toka izvršenja radnog zadatka, kao i neki vid teleoperacije čoveka nad robotom. Ovakve aplikacije najčešće podrazumevaju razvijanje interfejsa čovek-mašina (HMI), čija realizacija zavisi od procesa za koji se sistem projektuje i platforme na kojoj je bazirana.
- Mod 5:** Rad sa ROS operativnim sistemom (Robot Operating System). Upravljanje kretanjem robota (slaganje kretanja) odvija se na PC platformi baziranoj na ROS (Robot Operating System). Upravljački impulsi se generišu prema programiranom algoritmu na ROS platformi odakle se šalju ka FS100 sistemu putem TCP/IP konekcije. MotoPlus aplikacija u VxWORKS operativnom sistemu ima zadatak prijema informacija, izvršavanja komandi, i sinhronizacije rada dva operativna sistema. Osnovni značaj ovog moda rada je prevazilaženje ograničenja FS100 jedinice, pre svega u smislu memorijskog prostora za smeštanje nominalnog radnog zadatka robota. Pored prethodnog, ovaj mod proširuje istraživačke mogućnosti razvijenog sistema u smislu generisanja upravljačkih impulsa za različite algoritme slaganja kretanja, što je izuzetno značajno za upravljanje kinematskom redundansom robota u procesu spajanja delova.

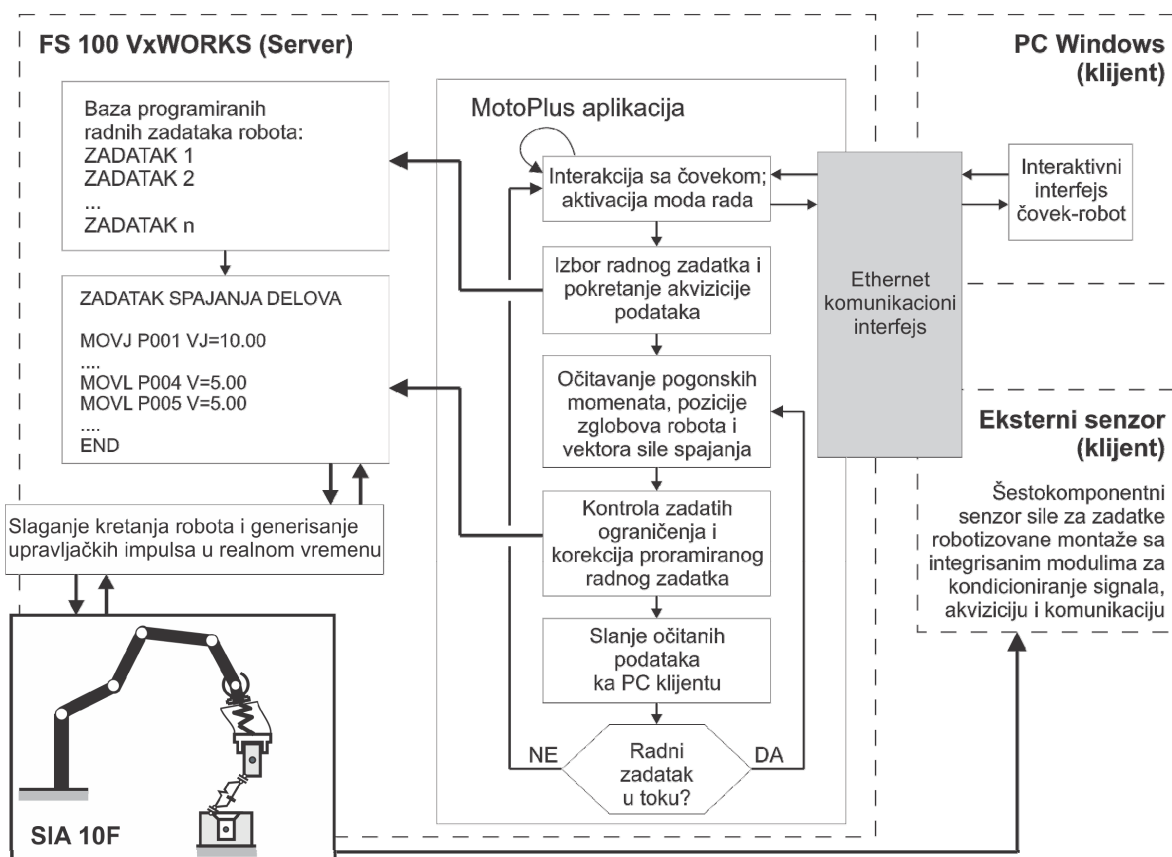
5.4 Primer

U nastavku se navodi primer koji ilustruje performanse i razvojne potencijale razvijenog eksperimentalnog robotskog sistema otvorene arhitekture.

Primer se odnosi na zadatak spajanja visokopreciznog cilindričnog para delova (zazor 0.02mm) izradjenih od čelika (otvrdnute i brušene kontaktne površine). Spajanje se izvodi u uslovima greške relativnog pozicioniranja reda veličine 1 mm. U okviru ovog primera

demonstrira se kompleksan eksperimentalni potencijal za praćenje stanja i adaptivno upravljanje kretanjem vrha robota tokom izvršavanja postavljenog zadatka spajanja. Hardverski sistem na kojem je realizovan ovaj primer je prikazan na slici 2.

Cilindrični objekat, osovina, koji je sa vrhom robota mehanički spregnut preko pasivne popustljive strukture RCC jedinice, treba iz inicijalne pozicije, kretanjem zatom brzinom po linijskoj trajektoriji duž z-ose, insertovati u stacionarni objekat koji na sebi ima komplementarni otvor. Po završetku procesa insertovanja, odnosno kada se dostigne krajnja z-koordinata, robot se istom trajektorijom vraća u inicijalni položaj. Zbog prisustva greške pozicioniranja i zbog greške u izvodjenju pravolinijskog kretanja duž z-ose koordinatnog sistema radnog zadatka, dolazi do kolizije objekata koji se spajaju (cilindrična osovina i komplementarni cilindrični otvor) i do pojave kontaktnih sila, koje u obliku generalizovanog vektora sile spajanja deluju na vrh robota i suprotstavljaju se kretanju robota. Da bi izvršio postavljeni zadatak, robot mora da savlada ove kontaktne otpore. Generalizovani vektor sile spajanja se registruje eksternim šestokomponentnim senzorom sile/momenata i akvizicionim sistemom uvodi u upravljački sistem robotske stanice. Takođe, eksternim laserskim senzorom (optička zavesa) prati se pomeranje osovine u lateralnoj ravni tokom faze prilaska i tokom procesa insertovanja. Unutrašnje i/ili spoljašnje koordinate robota i pogonski momenti na njegovim zglobovima (sedam aktivnih stepeni slobode) se prate pomoću aplikacije razvijene u MotoPlus SDK razvojnom okruženju i instalisane na robotskom kontroleru FS100.



Slika 6: *Struktura softverskog sistema za tri scenarija izvršavanja zadatka adaptivnog upravljanja procesa cilindričnog spajanja delova. Adaptivna komponenta ovog softverskog sistema je izvedena u okviru MotoPlus SDK razvojnom okruženju.*

Eksperiment adaptivnog spajanja se izvodi kroz tri osnovna scenarija:

Scenario 1: Upravljački sistem FS100 u realnom vremenu prati tekuće koordinate i pogonske momente na svim zglobovima robota; Izvršavanje zadatka spajanja se zaustavlja kada na bilo kom od 7 aktuatora dodje do pojave preopterećenja (pogonski moment veći od prethodno definisane maksimalne vrednosti); U ovakvom stanju upravljački sistem FS100 prepušta operatoru da donese odluku o daljoj realizaciju nominalnog zadatka.

Scenario 2: Upravljački sistem FS100 u realnom vremenu prati tekuće koordinate i pogonske momente na svim zglobovima; Opterećenje robota se održava ispod maksimalne dozvoljene vrednosti po svim stepenima slobode tako što robot sprovodi korektivna kretanja, odnosno aktivno menja nominalni zadatak definisan Job task programskim kodom koristeći tekuću vrednost opterećenja zglobova.

Scenario 3: Upravljački sistem FS100 u realnom vremenu prati tekuće koordinate i pogonske momente na svim zglobovima. Upravljački sistem simultano prati opterećenje aktucionog sistema robota i vektor sile spajanja (eksterno generisan i uvodi se preko odgovarajućeg serijskog interfejsa u FS100 kontroler) i na osnovu tih informacija sprovodi korektivna kretanja tako da opterećenje aktuatora i generalizovani vektor sile spajanja održava u zadatim okvirima; Održavanje opterećenja aktuatora je prioritetni upravljački zadatak.

Struktura upravljačkog softvera koji je razvijen za fizičku realizaciju navedenih scenarija za sprovođenje eksperimenta spajanja naveden ja na slici 6.

Dalje se detaljno prikazuje deo razvijenog softverskog sistema koji omogućava operatoru robotske radne stanice da prati pomeraje robota i pogonske momente u realnom vremenu. Kao što je prikazano na slici 6 ova funkcija se ostvaruje kroz niz algoritamskih blokova, a u nastavku se navode programski kodovi za neke od njih, uključujući programirani radni zadatak robota za spajanje delova.

Rutina za očitavanje pozicije i pogonskih momenata zglobova robota razvijena na bazi funkcija MotoPlus SDK biblioteke:

```
//Rutina se poziva sa sledecim ulaznim parametrima:
//cmd - grupa parametara kojim se definise koordinatni sistem roboota
//ret - promenljiva za slanje tekstualnih poruka ka PC klijentu
//BOOL bTCP - naznaka da se ret parametar direktno salje TCP modulom ka PC klijentu
void OcitavanjePodataka(char* cmd, char* ret, BOOL bTCP)
{
    //Definisanje lokalnog niza(memorijske lokacije) za smestanje stringa sa rezultatima
    //ocitavanja koji se salje ka PC klijentu putem TCP :
    char rez[200];
    //Definisanje lokalnih promenljivih u koje ce biti smesten status izvrsenja komande ocitavanja
    LONG dRet;
    LONG tRet;
    //Dodeljivanje MotoPlus parametara u odgovarajuce systemske (memorijske) lokacije
    MP_CTRL_GRP_SEND_DATA dxSendData; //Parametar koordinatnog sistema
    MP_PULSE_POS_RSP_DATA dxRet; //Rezultati ocitavanja pozicije zglobova robota
    MP_TORQUE_RSP_DATA txRet; //Rezultati ocitavanja pogonskih momenata zglobova
    //Preuzimanje podatka o koordinatnom sistemu iz ulaznog parametra rutine
    dxSendData.sCtrlGrp = parseParameter(cmd, "a1");
    //Pokretanje rutine definisane MotoPlus bibliotekom za ocitavanje pozicije zglobova robota
    //sa prethodno definisanim ulaznim parametrima
    dRet = mpGetFBPulsePos(&dxSendData, &dxRet);
    //Pokretanje rutine definisane MotoPlus bibliotekom za ocitavanje pogonskih momenata
    //zglobova robota sa prethodno definisanim ulaznim parametrima
```

```

tRet = mpGetTorque(&dxSendData, &txRet);
//Ukoliko je status izvršenja obe komande očitavanja podataka pozitivan:
if (nRet == OK && tRet == OK)
{
    //Smestanje rezultata očitavanja podataka u definisani niz(memorijsku lokaciju)
    sprintf(rez, "%d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; %d ; \r",
            dxRet.IPos[0], dxRet.IPos[1], dxRet.IPos[2], dxRet.IPos[3], dxRet.IPos[4],
            dxRet.IPos[5], dxRet.IPos[6], txRet.ITorquePcnt[0], txRet.ITorquePcnt[1],
            txRet.ITorquePcnt[2], txRet.ITorquePcnt[3], txRet.ITorquePcnt[4],
            txRet.ITorquePcnt[5], txRet.ITorquePcnt[6]);
    //Pozivanje rutine za slanje stringa sa rezultatima očitavanja podataka pozicije i pogonskih
    //momenata zglobova robota putem TCP modula
    outputAndLog(rez, bTCP);
}
//Ukoliko je status jedne od dve komande očitavanja podataka negativan, onda se tekstualna
//poruka o tome, putem definisanog ulaznog parametra (ret), salje direktno TCP modulom
else
    sprintf(ret, "Neuspesno očitavanje podataka");
}

```

Rutina za slanje podataka putem Ethernet komunikacionog interfejsa (TCP ili UDP) ka PC klijentu (softver je razvijen tako da se ova rutina kao funkcija poziva odmah nakon očitavanja podataka, što se može uočiti u prethodno navedenom programskom kodu):

```

//Rutina sa pokrece sa sledecim ulaznim parametrima:
//sOut - niz(string) koji se salje putem Ethernet komunikacionog interfejsa
//BOOL tcp - naznaka da se za komunikaciju koristi TCP modul
void outputAndLog(char* sOut, BOOL tcp)
{
    //Ukoliko ulazni niz sadrzi podatke onda se sprovodi procedura komunikacije
    if (strlen(sOut) > 0)
    {
        //Definisanje lokalne promenljive smestanje ulaznog stringa sOut
        char temp[MAX_BUFF];
        //Smestanje ulaznog stringa u lokalnu promenljivu
        sprintf(temp, "%s\r\n", sOut);
        //Slanje podataka putem Ethernet komunikacionog interfejsa
        //Opciono, podaci se mogu slati TCP ili UDP modulom
        //u zavisnosti od ulaznog parametra
        if (tcp)
        {
            mpSend(hSocketTCP, temp, strlen(temp), 0);
            puts("TCP_SEND_OUT...\r\n");
        }
        else
        {
            mpSendTo(hSocketUDP, temp, strlen(temp), 0, (struct sockaddr*)
                    &UDPclientSockAddr, sizeof(UDPclientSockAddr));
            puts("UDP_SEND_OUT...\r\n");
        }
    }
}

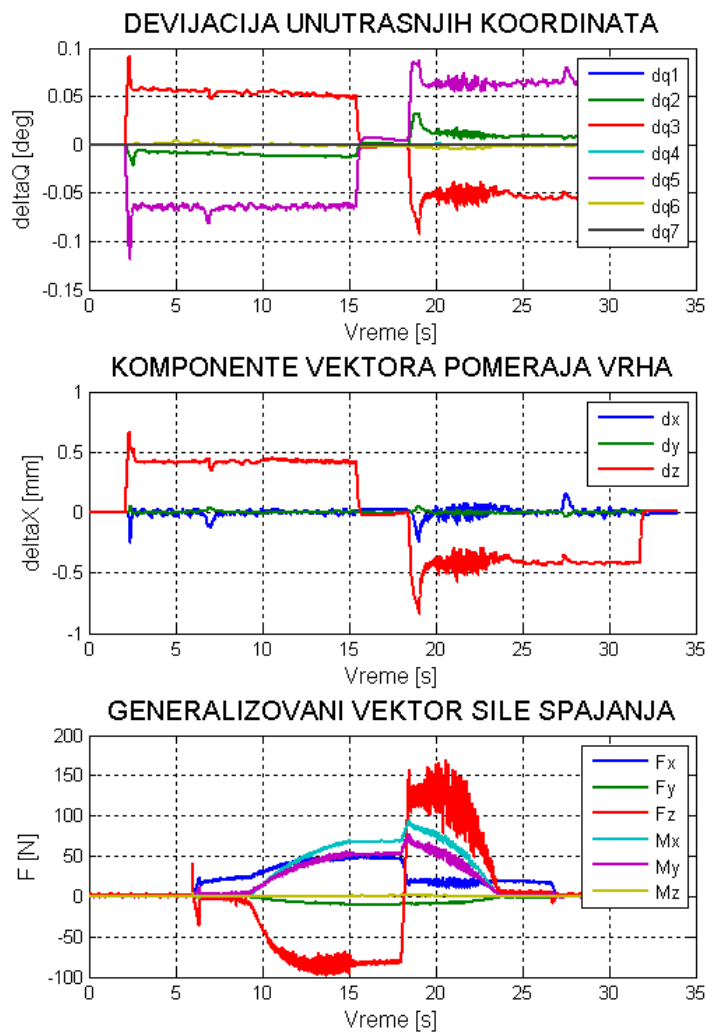
```


Programirani radni zadatak (JOB Task) sadrži niz instrukcija kojima se definiše način kretanja robota, pozicije između kojih je zadato kretanje vrha robota, i brzina kretanja. Dalje se navodi listing programskog koda nominalnog radnog zadatka kojim je izvršeno spajanje delova u primeru koji se opisuje:

```
//NAME SPAJANJE_1_EX_05_MM//Naziv zadatka (JOB task)
///TOOL 1//Alat na vrhu robota (u ovom slučaju RCC jedinica sa osovinom na vrhu). Kao parametri alata definisani su: korekcija u Z-pravcu (276 mm) i masa (2.8 kg)
///POSTYPE PULSE//Unutrasnje koordinate robota za svaku od tačaka koje su korišćene tokom generisanja nominalnog radnog zadatka
C00000=-58795,39132,-79180,44219,-115493,-6734,91768
C00001=-60810,41082,-86450,45689,-109139,-7789,91776
C00002=-61774,43141,-92427,47552,-103242,-8744,90658
C00003=-60810,41082,-86449,45689,-109139,-7789,91777
C00004=-58795,39132,-79180,44219,-115493,-6734,91768
///DATE 2014/01/12 19:18 //Vreme generisanja, programiranja radnog zadatka
///GROUP1 RB1//Parametri koordinatnog sistema u kome se programira i izvodi radni zadatak
NOP//No operation komanda (upravljačka jedinica robota je automatski dodaje pri generisanju svakog radnog zadatka)
MOVJ C00000 VJ=3.00//Globalno pozicioniranje vrha robota (osovine) vertikalno iznad otvora na visini 50 mm. Kretanje je izvedeno bez slaganja kretanja vrha robota (putanja vrha robota između početne i krajnje tačke nije linearna). Brzina kretanja: 3% od maksimalne brzine u zglobovima robota. Ovo kretanje praktično predstavlja izbor početne konfiguracije robotske ruke u procesu spajanja delova (kinematska redundansa omogućuje izbor velikog broja početnih konfiguracija za iste koordinate vrha robota, što ima uticaj na proces spajanja delova sa aspekta krutosti)
MOVL C00001 V=10.0//Lokalno pozicioniranje osovine iznad otvora na visini 10 mm, linearnim kratanjem vrha vertikalno naniže, brzinom od 10 mm/s
TIMER T=2.000//Vremenska pauza od 2 sekunde
MOVL C00002 V=3.0//Sekvenca insertovanja osovine u otvor, linearnim kratanjem vrha vertikalno naniže za 40 mm, brzinom od 3 mm/s
TIMER T=2.000//Vremenska pauza od 2 sekunde
MOVL C00003 V=3.0//Sekvenca izvlačenja osovine iz otvora, linearnim kratanjem vrha vertikalno naviše za 40 mm, brzinom od 3 mm/s
TIMER T=2.000//Vremenska pauza od 2 sekunde
MOVL C00004 V=10.0//Linearno kretanje vertikalno naviše na visinu 50 mm (sigurnosna distnaca)
END//Kraj izvršenja radnog zadatka (JOB task)
```

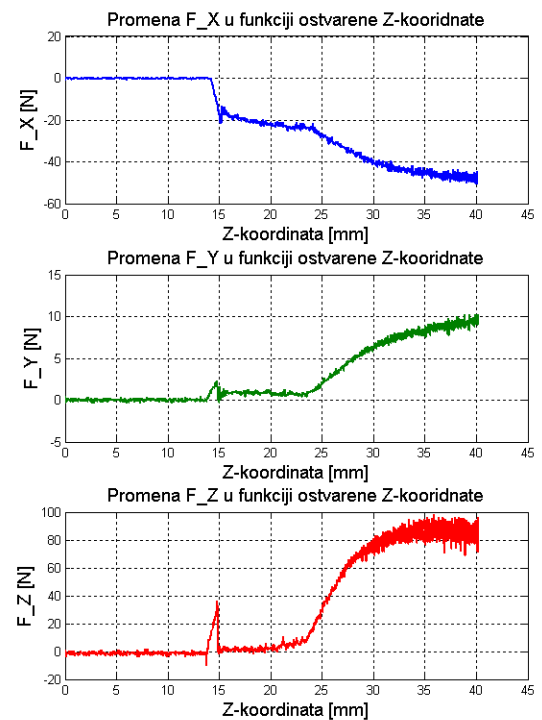
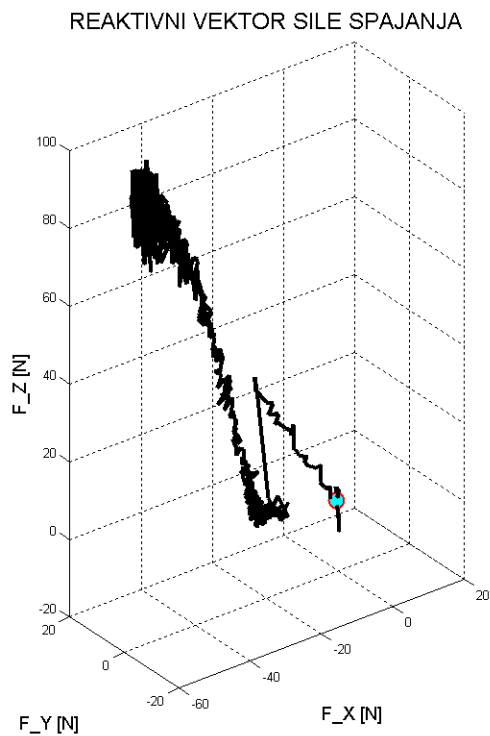
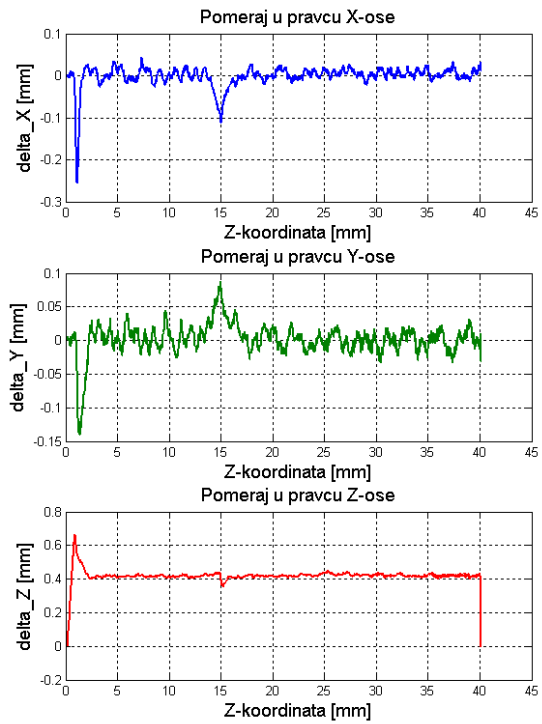
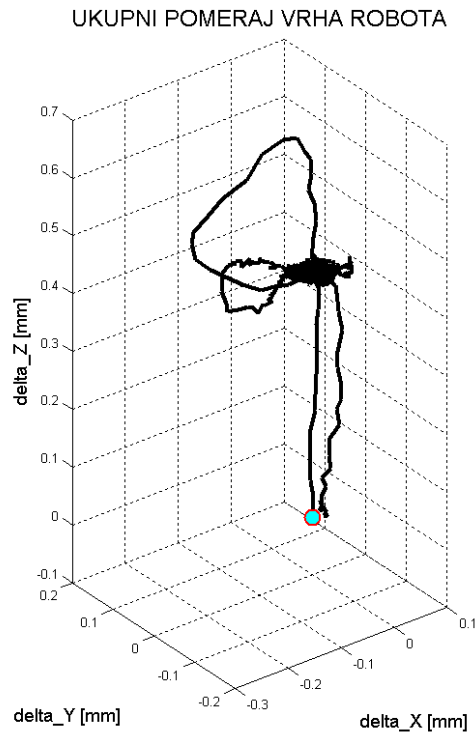
Dalje se navode grafički prikazi koji karakterišu sekvencu izvodjenja zadatka spajanja, kodiranu u skladu sa gore navedenim JOB Task-om i dopunskim rutinama razvijenim u MotoPlus SDK razvojnom sistemu. Na slici 7 se navode tri zapisa: 1)razlika između nominalnih i ostvarenih ugaonih koordinata u svih 7 zglobova, 2)razlika između nominalnih i ostvarenih linijskih koordinata TCP, koje su primenom direktne kinematske transformacije izračunate na osnovu ugaonih pomeraja zglobova i 3)komponente generalizovanog vektora

sile koji je registrovan eksternim šestokomponentnim senzorom sile. Navedeni grafici jasno pokazuju funkcionalnost razvijene MotoPlus aplikacije, koja generiše preciznu informaciju o kinematici robota u realnom vremenu – unutrašnje i spoljašnje koordinate kao funkcije vremena tokom kompletne sekvence izvršavanja postavljenog zadatka. Ovu informaciju nije moguće generisati kroz konvencionalni okvir interakcije korisnika i upravljačkog sistema robota. Dalje, razlika u komandovanim i ostvarenim unutrašnjim i spoljašnjim koordinatama jasno pokazuju karakter mehaničke interakcije robota sa njegovim okruženjem: dejstvo inercijalnih sila u prelaznim režimima, dejstvo gravitacione komponente, a takodje, i dejstvo kontaktnih sila tokom procesa spajanja koje se preko popustljive RCC jedinice prenose na kompletnu mehaničku i upravljačku strukturu robota.



Slika 7: *Vremenski zapis: a)devijacije unutrašnjih koordinata robota, b)devijacije spoljašnjih koordinata vrha robota, i 3)generalizovanog vektora sile spajanja. Sa desne strane je prikazana poza robota koja je korišćena u izvodjenju ovog eksperimenta (robot je redundantan, pa njegov konfiguracioni prostor u ovom slučaju omogućava neograničeni izbor inicijalnih poza/konfiguracija u okviru kojih će biti izveden postavljen zadatak).*

Na slici 8 prikazan je ukupni pomeraj vrha robota do okončanja sekvence insertovanja. Paralelno, prikazane su i njegove komponente u funkciji vremena. Analogno ovom zapisu prikazan je i grafik rezultantnog vektora sile spajanja (reaktivni vektor koji deluje na osovinu!) kao funkcija vremena (vremenska osa nije prikazana) i njegove 3 komponente kao funkcije ostvarene z-koordinata vrha robota.



Slika 8: *Prikaz ukupnog pomeraja vrha robota i reaktivnog vektora sile spajanja tokom sekvence insertovanja osovine u otvor (inicijalno stanje na prostornom grafiku je označeno kružnicom). U oba slučaja prikazani su i komponentni vektori, ali kao funkcija vremena, i kao funkcija z-koordinata, respektivno (z-koordinata je dobijena čitanjem odgovarajućeg registra FS100 robotskog kontrolera!).*

Navedeni zapisi, mada vrlo sadržajni i intrigantni sa aspekta razumevanja najfinijih detalja fenomena koji prate složenu interakciju robota sa okruženjem tokom procesa spajanja, dalje se ne razmatraju zbog tematskih ograničenja opisa ovog tehničkog rešenja. Razmatran primer i navedeni rezultati imaju isključivo svrhu demonstracije mogućnosti i performansi razvijene eksperimentalne platforme koja je predmet ovog tehničkog rešenja.

6. ZAKLJUČAK

Tehničko rešenje: **Eksperimentalni sistem otvorene arhitekture za adaptivno upravljanje redundantnim antropomorfnim robotom u izvršavanju zadataka spajanja u okviru sistema za automatsku montažu**, izvedeno je u obliku specijalizovane eksperimentalne instalacije u okviru Laboratorije za kibernetiku i mehatronske sisteme, Katedre za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Ova eksperimentalna instalacija je izvedena kao eksperimentalni sistem vrhunskih tehničkih performansi, jedinstven u regionu, i rezultat je razvojno-istraživačkih aktivnosti projektnog tima Mašinskog fakulteta na projektu TR35007. Upravljački sistem otvorene arhitekture omogućava pristup u realnom vremenu sistemskim funkcijama robota i na osnovu toga praktičnu implementaciju neograničenog spektra algoritama za adaptivno upravljanje ponašanjem robota i njegove interakcije sa okruženjem (sistem za montažu) u realnom vremenu. U narednoj fazi planira se dalja dogradnja robota novom generacijom senzora sile i različitih optičkih senzora za merenje pomeraja vrha robota u realnom vremenu i generisanje vizuelne povratne sprege.

7. LITERATURA

- [1] A. S. de Oliveira, R. Guenther, "Embedded open architecture robotic controller for position and force control", 19th COBEM – International Congress of Mechanical Engineering, ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 3, pp.308-315, Brasília, 5.-9. Nov. 2007.
- [2] V. Lippiello, L. Villani, B. Siciliano, "An open architecture for sensory feedback control of a dual-arm industrial robotic cell", *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 34, No. 1, pp. 46-53, 2007.
- [3] A. Macchelli, C. Melchiorri, "A real-time control system for industrial robots and control applications based on real-time linux", IFAC, 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
- [4] P. Petrović, N. Lukić, I. Danilov, "Industrijski humanoidi - novi koncept robota za kolaborativni rad čovek-mašina u sistemima za robotsku montažu", Zbornik radova 38. JUPITER konferencija, 34. simpozijum NU-ROBOTI-FTS, str. 3.126-3.139, Beograd 2012.
- [5] P. Petrović, N. Lukić, I. Danilov, "Compliant behavior of redundant robot arm - experiments with null-space", Proceedings of 1st International conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcEtran 2014, Vrnjačka Banja, Serbia, june 2.– 5., pp. roi1.2. 1-6, 2014.
- [6] P. Petrović, N. Lukić, I. Danilov, "Configuration Based Compliancance Control of Industrial Humanoids", Proceedings of the 17th International Multiconference, INFORMATION SOCIETY – IS 2014, Volume F ROBOTICS, October 2014, Ljubljana, Slovenia, pp. 25-29.
- [7] YASKAWA Motoman Robotics, FS100 Instructions, User's Manual for New Language Environment MotoPlus, Septembar, 2012.
- [8] YASKAWA Motoman Robotics, FS100 Instructions, Programmer's Manual for New Language Environment MotoPlus, Septembar, 2012.
- [9] YASKAWA Motoman Robotics, FS100 Instructions, Reference Manual for New Language Environment MotoPlus (API Function Specification), Septembar, 2012.