

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 2013-01

**INTELIGENTNI MIKRO-
ELEKTROMEHANIČKI SENZORSKI SISTEM
ZA MERENJE UGAONIH KOORDINATA
POLOŽAJA PROSTORNIH OBJEKATA U
REALNOM VREMENU**

Beograd, januar 2014.

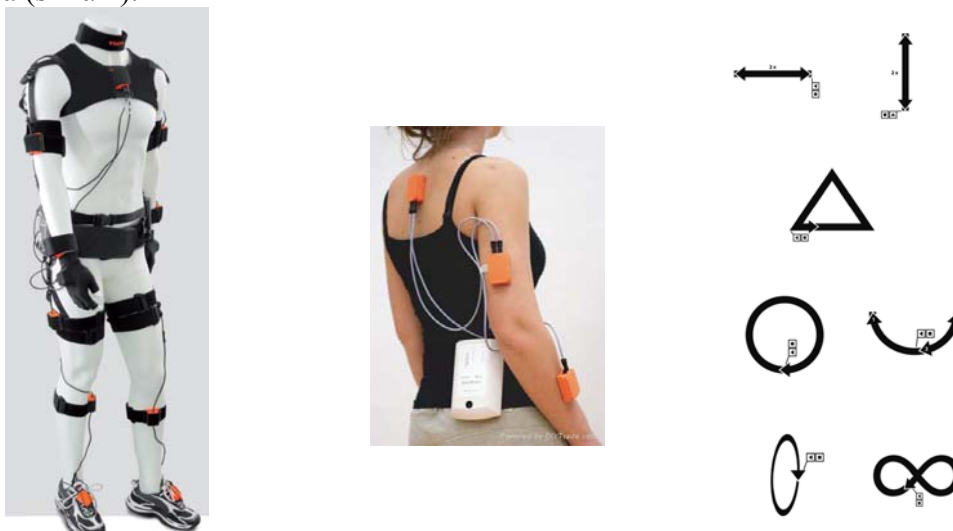
Specifikacija tehničkog rešenja u skladu sa Pravilnikom za vrednovanje rezultata istraživanja Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije:

Vrsta tehničkog rešenja	Laboratorijski prototip (M85)
Autori tehničkog rešenja	Prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Dušan Nikić, dipl. inž. maš.
Naziv tehničkog rešenja	Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu
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	2013.
Verifikacija rezultata	Od strane recenzenata: Prof. dr Janko Hodolič, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad Prof. dr Radovan Puzović, 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 - CeNT, Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

1. OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOSI

Šire posmatrano, ovo tehničko rešenje se odnosi na oblast navigacionih senzorskih sistema nove generacije, baziranih na primeni MEMS (mikro-elektromehaničke) tehnologije, kao generičke osnove za vrlo širok spektar praktičnih primena: industrija (robotika), aerokosmotehnika (različite vrste letilica, uključujući i dronove, odnosno autonomne leteće robotske sisteme), sport (praćenje kretanja sportista na makro i mikro nivou, unparedjenje performansi, treniranje, ...), medicina (dijagnostika stanja motorike i rehabilitacija), zabava (uključujući i filmsku industriju) i druge oblasti u kojima je neophodno praćenje orijentacije objekta u prostoru i trajektorije njegovog kretanja.

Tehničko rešenje je razvijeno u okviru projekta TR35007 za deo istraživanja koji se odnosi na identifikaciju ponašanja, konkretno motornih funkcija čoveka u izvodjenju proizvodnih zadataka u domenu tehnologije montaže (pokreti ruku, tela). Pored identifikacije ponašanja, tehničko rešenje je nastalo i kao potreba izgradnje jednostavnih, intuitivnih i visokoefikasnih interfejsa za spregu čoveka i proizvodnog sistema, prvenstveno robota, sa ciljem ostvarivanja komunikacije kroz korišćenje manuelne gestikulacije, odnosno kroz uspostavljanje neke vrste gestualne azbuke iz koje se dalje može izgraditi odgovarajući jezik za efektivan prenos informacija (slika 1).



Slika 1: *Koncept akvizicije kretanja tela i ponašanja čoveka u izvršavanju radnih zadataka u industrijskoj proizvodnji (levo i centar) i primer azbuke za gestualnu komunikaciju pokretima između čoveka i robota (senzor integrisan u rukav ili u obliku rukavice ili narukvice može da generiše dovoljan informacioni sadržaj za dovoljno diskriminativne vremenske sekvence koje se mogu prepoznati kao slova gestualne azbuke).*

Osnovni motiv za ovakvu istraživačko-razvojnu aktivnost je bila potreba za minijaturnim i potpuno otvorenim senzorskim sistemom, koji će moći da se jednostavno replikuje uz minimum investicija u opremu.

Vrednost ovog tehničkog rešenja je u tome što je praktično demonstrirano da nauka Srbije poseduje dovoljno tehničkih znanja i sposobnosti da praktično primenjuje najnovije generacije MEMS senzora i snažnih mikroprocesorskih sistema, i da se kroz taj okvir mogu izgraditi inovativni, visokotehnološki proizvodi. Konkretno, ovim aktivnostima je praktično realizovan ekstremno kompleksan i ekstremno kompaktan sistem, koji se u kombinaciji bežičnog prenosa i ekstremno male potrošnje energije, može da se efikasno koristiti kao mikrosenzorski sistem sa ugrađenim komponentama inteligentnog ponašanja svuda gde je potrebno praćenje ugaonog položaja krutih tela u prostoru u realnom vremenu.

2. TEHNIČKI PROBLEM

Praćenje položaja krutog tela u prostoru nije nov tehnički zadatak. Navigaciju u ravanskom ili trodimenzionalnom prostoru je nemoguće ostvariti bez odgovarajućeg senzorskog sistema. Izgradnja navigacionih senzorskih sistema je uvek bila povezana sa raspoloživom tehnologijom. U vreme otkrivanja sveta, kada su se brodovi otiskivali u nepoznata morska prostranstva, korišćen je sekstan, kompas i zvezdano nebo. U savremenom svetu, koriste se naprednije tehnologije. Za akviziciju kretanja ljudskog tela najčešće se koriste tehnologije bazirane na primeni kamera, pomognutih različitim vrstama markera, kako bi se proces praćenja u prostoru učinio jednostavnijim, ili pouzdanijim. Alternativno, primenjuju se sistemi bazirani na magnetskoj lokaciji, akustičkoj lokaciji, ili čak lokaciji preko pasivnih mehaničkih struktura koje su mehanički povezane sa telom. Ovakve tehnologije poseduju čitav niz ograničenja (na primer, ograničenje vidljivosti markera u određenim situacijama i slično) i zato je njihova primena samo parcijalno uspešna. Pojava MEMS senzorske tehnologije, omogućila je da se klasični navigacioni sistemi koji su se decenijama uspešno koristili u vazduhoplovstvu i kosmotehnici, prenesu i u oblast akvizicije motorike ljudskog tela. Mehanički žiroskop je u vazduhoplovstvu bazni senzorski sistem na osnovu kojeg se određuju tri ugaone koordinate, takozvani Ojlerovi uglovi. U cilju pouzdanog referenciranja, koristi se kompas, koji generiše informaciju o pravcu i smeru koordinatne ose usmerene ka Severnom polu i akcelerometar, koji generiše informaciju o pravcu i smeru vertikalne ose globalnog koordinatnog sistema. Mada je tehnički ova tehnologija sasvim korektna, njena primena u zadacima koji su navedeni u tački 1, a posebno u domenu proizvodnih tehnologija i robotike, bila je ograničena gabaritnim merama ovih senzora. MEMS tehnologija stvorila je prostor za rešavanje ovog problema.

3. STANJE TEHNIKE

MEMS tehnologija doživljava svoju komercijalnu i razvojnu eksploziju i MEMS proizvodi postaju sve prisutniji u mnogim uređajima za profesionalnu civilnu i vojnu primenu, kao i u svakodnevnom životu. MEMS senzorski sistemi su počeli da se pojavljuju u mobilnim uređajima, pre svega u mobilnim telefonima i minijaturnim navigacionim sistemima. Zbog ekstremno niske cene, njihova primena je opravdana čak i za praćenje rukovanja vrednim poštanskim pošiljkama. MEMS senzorski sistemi se izvode kao potpuno integrisani uređaji, koji se pakuju u standardna minijatura kućišta, razvijena za pakovanje integrisanih kola u SMD tehnologiji. U cilju ostvarivanja dalje minijaturizacije, tehnologičnosti primene i redukcije cene, MEMS senzori se često integrišu u jedno kućište, tako da se dobijaju multifunkcionalni sistemi velike tehničke vrednosti. Dobavljalivost ovih senzora je jednostavna, a jedinična cena ne prelazi par EUR u malim serijama.

Primer naveden na slici 1 je komercijalno raspoloživa hardverska osnova tehnologije za praćenje motorike ljudskog tela proizvođača Xsens (3D motion tracking), Holandija. U okviru projekta TR35007 pokrenute su razvojne aktivnosti sa ciljem razvoja naprednijeg rešenja koje je bazirano na ekstremno kompaktnim MEMS pretvaračima i bežičnoj tehnologiji za njihovo umrežavanje.

4. KONCEPT TEHNIČKOG REŠENJA

Navigacioni senzorski sistem se sastoji iz tri osnovna senzora: 1) troosni žiroskop koji generiše informaciju o ugaonoj brzini, 2) troosni akcelerometar koji generiše informaciju o ubrzanju i 3) troosni magnetometar koji generiše informaciju o intenzitetu prostornog magnetnog polja. Ova tri senzora generišu ukupno 9 senzorskih informacija koje su na direktan način povezane sa položajem krutog tela u prostoru. Odgovarajućim algoritima, ovaj visokoredundantni senzorski vektor svodi se na vektor orijentacije, odnosno triplet koordinata

izraženih u Ojlerovim uglovima, koji definišu trenutni položaj krutog tela u prostoru. Triplet ugaonih koordinata generiše se u realnom vremenu i odgovarajućom komunikacijom prosledjuje ka drugim digitalnim sistemima. Generisanje tripleta ugaonih koordinata ostvaruje se u specijalizovanom integrisanom mikroprocesorskom sistemu, minijaturnih dimenzija, koji se ugrađuje u senzorski sklop i time se dobija jedna zaokružena funkcionalna celina. Mikroprocesor omogućava da ovakav senzorski sistem bude komunikativan i ostvari veliko bogatstvo u svom ponašanju, pa time dobija atribut inteligentnog uređaja.

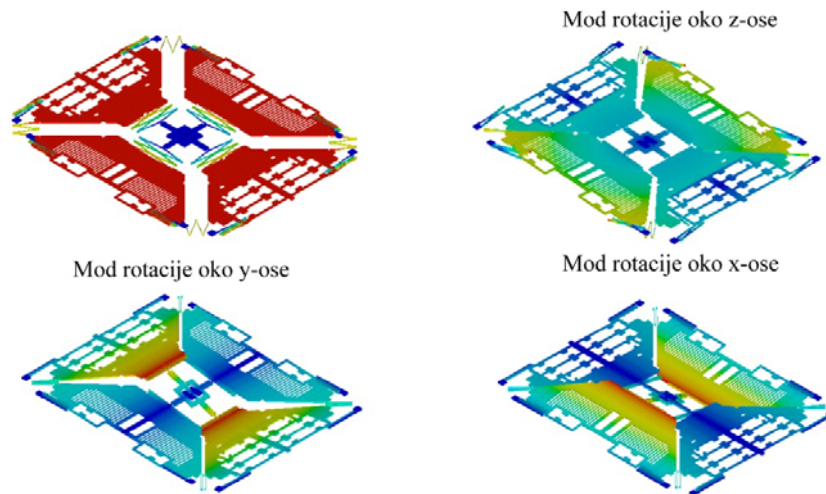
5. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Primarni pretvarač za identifikaciju ugaonog tripleta je troosni žiroskop. Žiroskop nije osetljiv na ubrzanje i nije osetljiv na magnetsko polje Zemlje ili drugih magnetski aktivnih objekata. Integracijom tri senzorska signala, svaki za po jednu od koordinatnih osa koje čine lokalni koordinatni sistem senzora koji je vezan za telo elektronskog sklopa žiroskopa, odnosno kućište integrisanog kola, dobijaju se tri ugaone koordinate. Integracijom se nagomilava greška, što ima veliki uticaj na metrološke performanse žiroskopa. Takođe, žiroskop nema prirodnu referencu u odnosu na spoljašnji koordinatni sistem. Greške koje se generišu po ovom osnovu su takve da žiroskop kao izolovanu jedinicu čine praktično neupotrebljivim. Na slici 2 prikazan je konvencionalni mehanički žiroskop (*CIELO Navigation and Control Inertial Solutions*) i MEMS žiroskop L3GD20 koji je korišćen u okviru projekta TR35007.



Slika 2: Mehanički žiroskop (levo) i MEMS žiroskop L3GD20, dimenzija kućišta 4x4x1mm, koji je korišćen u razvojnim aktivnostima na izradi ovog tehničkog rešenja (desno).

Pored elektronskog sklopa (ASIC), integrisano kolo žiroskopa sadrži i mehaničku pokretnu strukturu pretvarača, koja ima oblik deformabilne piezo rešetke mikrometarskih razmera. Ta rešetka se dovodi u stanje rezonanse i zatim se primenom koncepta Koriolisovog vibracionog žiroskopa mogu da registruju poremećaji u režimu njenog oscilovanja koji su proporcionalni spoljašnjim silama izazvanih njenim prostornim pomeranjem (suština je u tome da se unutrašnji delovi MEMS čipa fizički pomeraju!). Ovakav sklop ekstremne kompleksnosti dobijen je mikromehaničkom obradom (nelitografskim postupkom!). Na slici 3 prikazan je princip rada MEMS žiroskopa.



Slika 3: *Koncept MEMS konstrukcije pretvarača vibracionog koriolisovog žiroskopa navedenog na slici 2.*

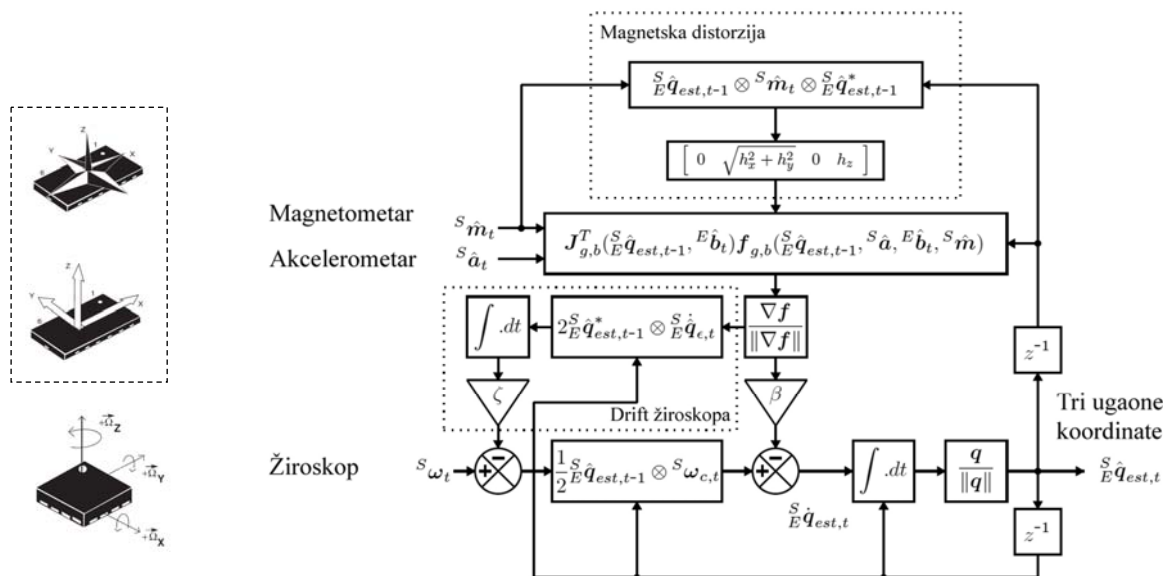
Da bi se rešio problem reference i akumulacije greške integracije, u senzorski sistem žiroskopa se uvode dva dodatna troosna senzora. Njihova osnovna uloga je da obezbede stabilnu referencu u odnosu na globalni koordinatni sistem.

Prvo, to je akcelerometar koji daje informaciju o ubrzanju duž tri ortogonalne ose sopstvenog lokalnog koordinatnog sistema. Da bi se odredio ugaoni pomeraj neophodna je dvostruka integracija senzorskih signala akcelerometra. Dvostruka integracija generiše veliku grešku, ali akcelerometar prirodno ima jednu vrlo stabilnu referencu, a to je vektor ubrzanja gravitacionog polja Zemlje. Nedostatak akcelerometra je u tome što on samo u mirovanju može da registruje ovu referencu na direktan način, svaki drugi pomeraj, uključujući i vibracije, unosi poremećaj, u opštem slučaju po sve tri koordinatne ose.

Drugi senzor koji se dodaje žiroskopu za generisanje stabilne reference jeste magnetometar, odnosno elektronski kompas. Ovaj sklop koji u svojoj osnovi ima Halov pretvarač koji je osetljiv na intenzitet magnetskog polja, registruje komponente vektora magnetskog polja koje postoji na fizičkoj lokaciji na kojoj se senzor nalazi u određenom trenutku. U opštem slučaju, dominantno je magnetsko polje Zemlje, tako da senzor ima jednu apriori poznatu stabilnu referencu i to po koordinatnoj osi koja je ortogonalna u odnosu na referencu gravitacionog polja koje registruje troosni akcelerometar. Problem sa magnetometrom je u tome što geomagnetsko polje nije uniformno u statičkom domenu a takođe ni u dinamičkom domenu. Dinamički domen se odnosi na poremećaje koje izazivaju lokalno prisutni magnetski izvori (elektromehanički uređaji, motori, metalne konstrukcije, ...).

Suština pristupa koji je primenjen za izgradnju troosnog senzorskog modula je u tome da se vrši fuzija senzorskih signala žiroskopa, akcelerometra i magnetometra. Fuzija ovih senzorskih signala nije trivijalan problem, već naprotiv, vrlo delikatan zadatak koji nema jednoznačno rešenje. Na slici 4 prikazan je jedan od varijantnih algoritama za senzorsku fuziju ove vrste.

Izgradnja senzorskog sistema izvedena je kroz dve razvojne faze, koje se razlikuju u arhitekturi sistema, odnosno podeli funkcionalnih zadataka između integrisanog mikroprocesorskog sistema i PC računara kao osnovnih hardverskih platformi.



Slika 4: Jedan od varijantnih algoritama razvijenih za fuziju devetokanalnog izlaza redundantnog pretvaračkog bloka koji se sastoji iz troosnog žiroskopa, troosnog akcelerometra i troosnog magnetometra, i generisanje izlaza u obliku tripleta ugaonih koordinata. Algoritam sadrži intenzivna izračunavanja u realnom vremenu i zato zahteva moćni mikroprocesorski resurs za obradu senzorskih signala u realnom vremenu.

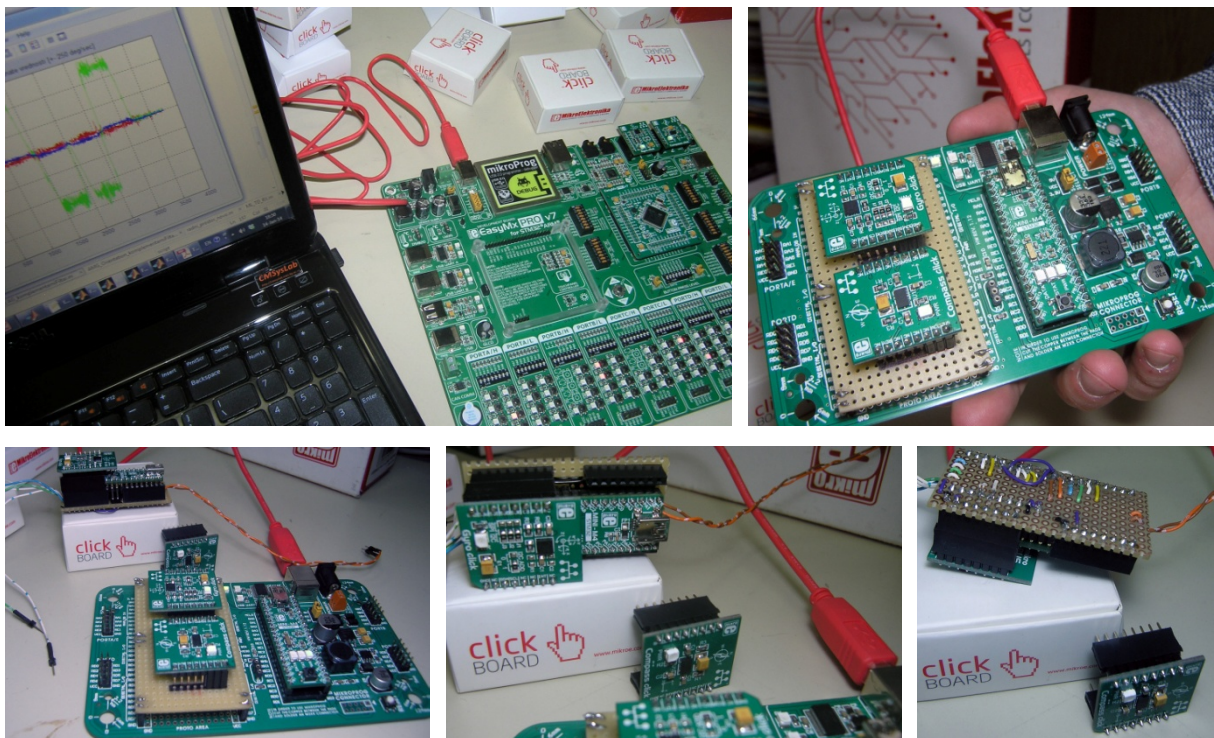
Prva razvojna faza obuhvata sledeće funkcije implementirane na mikroprocesorsku platformu: 1)komunikaciju sa senzorskim modulima, 2)preuzimanje devet senzorskih informacija, 3)primarna obrada senzorskih signala i 4)slanja primarno obradjenih senzorskih podataka na PC računar. Funkcija finalne obrade devet senzorskih informacija (generisanje tripleta ugaonih koordinata) u ovoj fazi razvijena je i implementirana na PC računaru, u softverskom okruženju MATLAB. Prateće funkcije implementirane na PC platformi su komunikacijski blok za preuzimanje podataka sa mikrokontrolera i generisanje grafičkih prikaza sirovih i obradjenih informacija, odnosno funkcija vizuelizacije, čime se obezbeđuje mogućnost provere računске korektnosti i efikasnosti primenjenih algoritama za obradu senzorskih signala.

U okviru druge razvojne faze funkcija izračunavanja tri ugaone koordinate na osnovu devet senzorskih informacija implementirana je u celosti na integrisanu mikroprocesorsku platformu uz prethodno navedene funkcionalne module (slika 5). U ovoj razvojnoj fazi je samo funkcija vizuelizacije sprovedenih matematičkih izračunavanja, uz modul za komunikaciju, implementira na PC računaru i MATLAB okruženju kao komfornoj platformi za ekstenzivnu analizu, proveru ostvarenih performansi i arhiviranje.

Na slici 5 prikazan je hardver razvojnog sistema koji je korišćen na ovom projektu. Ključne komponente su: 1)L3GD20 ST Microelectronics žiroskop sa integrisanim temperaturnim sensorom, smešten u minijaturno kućište 4x4x1mm, sa 16 kontaktnih izvoda, temperaturnim radnim opsegom od -40 do +85°C, sa tri radna intervala osetljivosti $\pm 250 / \pm 500 / \pm 2000$ dps, analogno-digitalnom konverzijom rezolucije 16 bit i I2C/SPI serijskim interfejsom za komunikaciju sa nadređenim digitalnim uređajem i 2)LSM303DLHC ST Microelectronics kombinovani sklop akcelerometra i magnetometra koji je smešten u kućište dimenzija 3x5x1mm, sa 14 kontaktnih izvoda, temperaturnim radnim opsegom od -40 do +85°C, radnim opsegom magnetometra od ± 1.3 do ± 8.1 gauss, radnim opsegom akcelerometra u sledećim intervalima $\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g / \pm 16g$, analogno-digitalnom konverzijom rezolucije 16 bit i I2C serijskim interfejsom za komunikaciju sa nadređenim digitalnim uređajem.

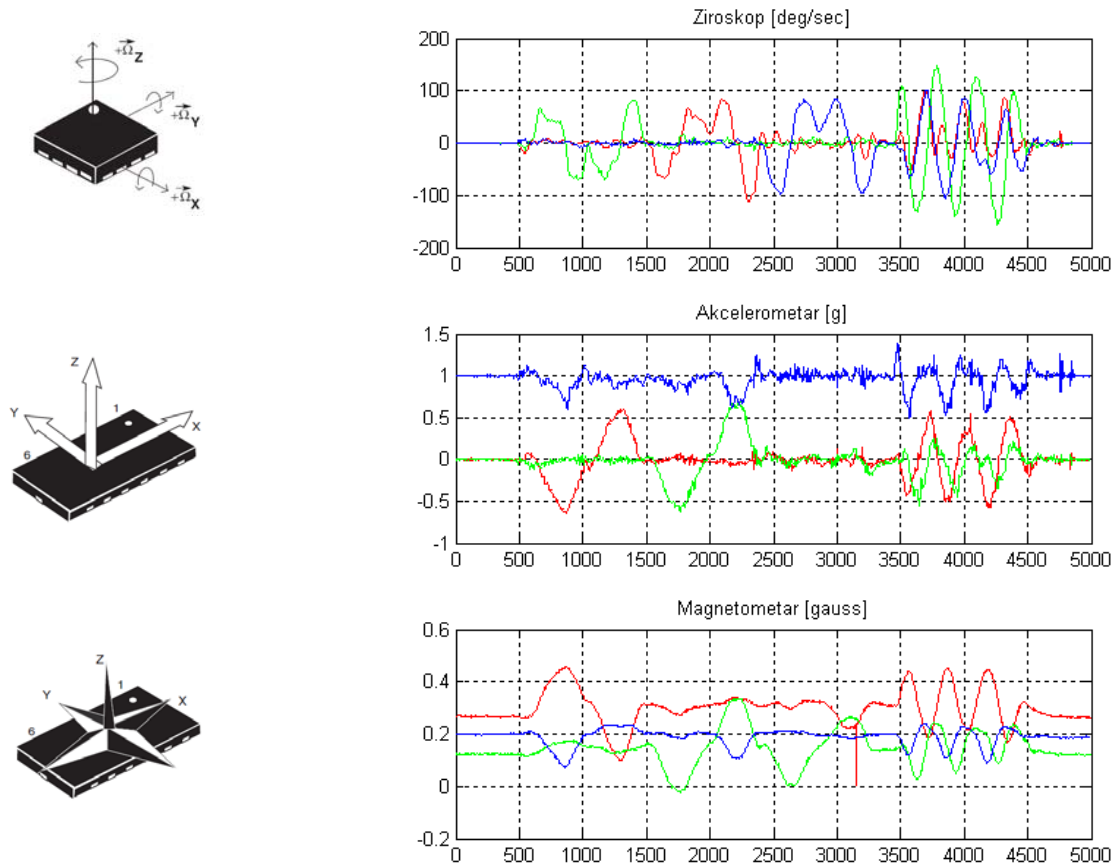
Na slici 5, dole centar i dole desno, prikazan je konačni ishod druge razvojne faze razvoja ovog tehničkog rešenja: funkcionalno kompletan inteligentni senzorski modul, koji generiše triplet ugaonih koordinata frekvencijom od 100Hz, sa tačnošću od $\pm 1^\circ$. Tripleti ugaonih koordinata se preko serijskog SPI interfejsa prosledjuju nadređenom digitalnom sistemu. Sklop inteligentnog senzorskog sistema obuhvata: 1) troosni MEMS žiroskopskog senzora L3GD20, 2) troosne acelerometarske i magnetometarske senzore spakovane u MEMS integrisani senzorski sklop LSM303DLHC, i 3) integrisani mikroprocesorski sistem 32-bitne arhitekture sa 160 MHz taktom, ARM Cortex STM32F415RG mikrokontroler. MEMS senzorski moduli komuniciraju sa Cortex procesorom preko I2C serijskog interfejsa.

Ovaj senzorski modul je rezultat samogradnje na projektu TR35007 i u celosti (hardver i softver) predstavlja originalan razvojni rezultat.

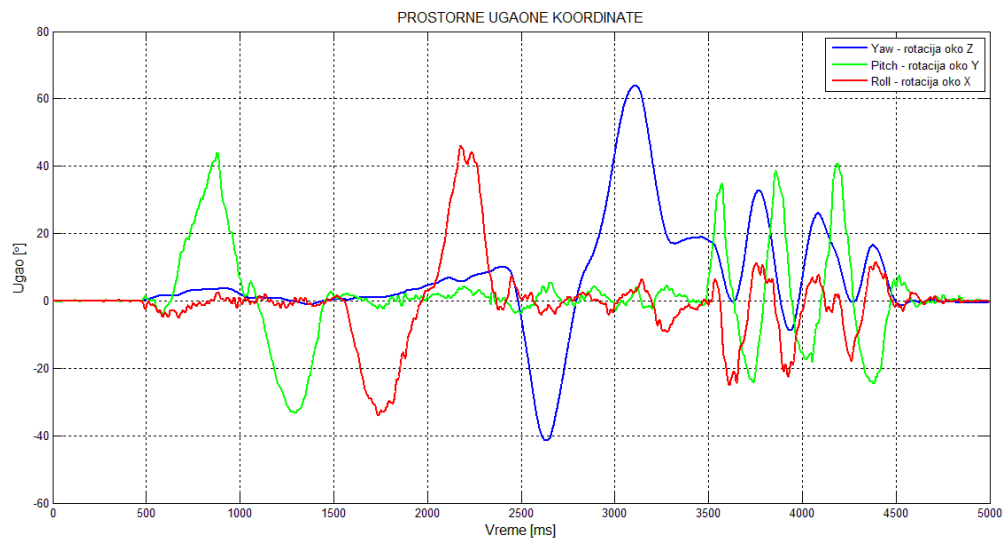


Slika 5: Fotografije sistema koji je korišćen za razvoj senzorskog modula tokom prve i druge faze razvojnih aktivnosti. Fotografija gore levo prikazuje opremu korišćenju u prvoj fazi koja je bazirana na EasyMxPROv7 for STM32 razvojnom sistemu kompanije Mikroelektronika. Na fotografijama dole centar i dole desno prikazan je konačni ishod druge razvojne faze: funkcionalno kompletan inteligentni senzorski modul koji generiše triplet ugaonih koordinata frekvencijom od 100Hz i serijskim SPI interfejsom ih prosledjuje nadređenom digitalnom sistemu. Sistem je baziran na ARM Cortex STM32F415RG mikroprocesoru 32-bitne arhitekture i 160MHz radnim taktom.

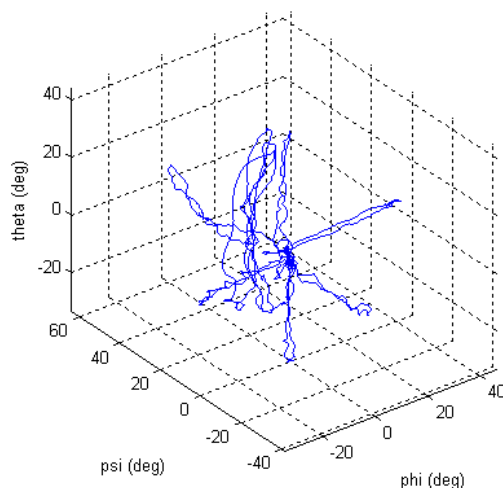
U cilju ilustracije funkcionalnih performansi, na slikama 6, 7 i 8 prikazani su rezultati dobijeni u drugoj fazi razvoja, odnosno: 1) devet kanala neobradjenih senzorskih signala, 2) vremenski zapis tripleta ugaonih koordinata generisanog razvijenim kompenzacionim algoritmom za fuziju 9 redundantnih senzorskih kanala i 3) prostorni prikaz trajektorije kretanja tela senzora tokom eksperimenta.



Slika 6: *Senzorski signali koje generišu žiroskop, akcelerometar i magnetometar u jednom tipičnom primeru prostornog kretanja krutog tela.*



Slika 7: *Primer zapisa generisanih tripleta ugaonih koordinata koji je izveden iz senzorskih signala generisanih na slici 6. Jasno se uočava kako se posle slučajnog kretanja u prostoru u trajanju od 5 sec telo vraća u isti inicijalni položaj – greška integracije praktično nije vidljiva u ovoj razmeri.*



Slika 8: *Prostorna vizuelizacija trajektorije razvijenog senzorskog sistema izvedena iz grafika prikazanog na sici 7.*

6. ZAKLJUČAK

Tehničko rešenje: **Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu**, izvedeno je u obliku laboratorijskog prototipa, kojim su demonstrirana znanja i veštine projektnog tima TR35007 u domenu razvoja naprednih navigacionih senzorskih modula koji su bazirani na MEMS tehnologiji i najnovijoj generaciji 32-bitnih ARM Cortex integrisanih mikroprocesorskih sistema. Razvijen prototip, pored hardvera obuhvata i set firmware rutina koje omogućavaju jednostavno korišćenje senzorskog sistema u okviru gradnje različitih aplikacija. Ovakav senzorski sistem generiše triplete ugaonih koordinata sa frekvencijom 100Hz i tačnošću od $\pm 1^\circ$. U narednoj fazi planira se komercijalizacija ovog tehničkog rešenja u saradnji sa kompanijom Mikroelektronika iz Beograda.

7. LITERATURA

- [1] S.O.H. Madgwick, "An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor array", Report x-io and University of Bristol (UK), 2010.
- [2] B. Delporte, L. Perrotton, T. Grandpierre, J. Trichet, "Accelerometer and Magnetometer Based Gyroscope Emulation on Smart Sensor for a Virtual Reality Application", *Sensor and Transducers Journal* 14 (1), Special Issue, pp: 32-47, 2012.
- [3] A. M. Sabatini "Estimating Three-Dimensional Orientation of Human Body Parts by Inertial/Magnetic Sensing", *Sensors* 11 (2), pp: 1489-1525, 2011.
- [4] S. Sabatelli, "A double stage Kalman filter for sensor fusion and orientation tracking in 9D IMU", *Sensors Applications Symposium (SAS)*, IEEE, pp: 1-5, 2012.
- [5] H. J. Luinge, P. H. Veltink, "Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers", *Medical and Biological Engineering and Computing* 43 (2), pp: 273-282, 2005.
- [6] S.O.H. Madgwick, A.J.L. Harrison, R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm", *International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, IEEE, pp: 1-7, 2011.
- [7] STMicroelectronics, L3GD20 low-power MEMS motion sensor: 3-axis digital gyroscope, Datasheet, DocID022116 Rev 2, February 2013.
- [8] STMicroelectronics, LSM303DLHC Ultra compact high performance MEMS e-compass: 3D accelerometer and 3D magnetometer module, Datasheet, DocID018771 Rev 2, November 2013.
- [9] STMicroelectronics, STM32F415RG High-performance ARM Cortex-M4 MCU with DSP and FPU, Datasheet, DocID022063 Rev 4, June 2013.

Odlukom Naučno-nastavnog veća Mašinskog fakulteta u Beogradu br. 2681/2 od 26.12.2013. godine imenovani smo za recenzente tehničkog rešenja **Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu**, autora: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Dušan Nikić, dipl. inž. maš. Na osnovu predloga ovog tehničkog rešenja podnosimo sledeći:

IZVEŠTAJ

Tehničko rešenje: **Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Dušan Nikić, dipl. inž. maš., opisano je na 10 stranica A4 formata pisanih sa 12pt singl proreda, sadrži 12 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

Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu, koji su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Dušan Nikić, dipl. inž. maš., rezultat je višegodišnjih razvojnih iskustava u oblasti mehatronskih sistema i posebno, mikroprocesorskih sistema upravljanja i sensorike. Ovaj sistem je realizovan u okviru istraživačko-razvojnih aktivnosti na projektu TR 35007 **sa ciljem izgradnje sistema za akviziciju čovekovog ponašanja u izvodjenju tipičnih zadataka u domenu tehnologije montaže i izradi interfejsa za spregu čoveka i mašine na bazi gestikulacije rukama i prepoznavanja specifične gestualne azbuke koja stvara prostor za izgradnju novog sistema za efektivnu interakciju čoveka sa robotskim sistemima.**

U prvom poglavlju se navode osnovna razmatranja o problematici prenosa znanja sa čoveka na robotske sisteme i problematici izgradnje efektivnih interfejsa između čoveka i robota sa ciljem radikalnog pojednostavljenja i ubrzavanja programiranja robota i u nekoj krajnjoj instanci, kooperativnog rada čoveka i robota u zajedničkom radnom prostoru.

U drugom poglavlju definiše se suština problema uspostavljanja delotvornog komunikacionog kanala između čoveka i robota. U tom smislu posebno se izdvaja gestualni jezik spregnut sa savremenom MEMS tehnologijom za akviziciju pokreta čovekovog tela i njegovih ekstremiteta u realnom vremenu.

U trećem poglavlju se daje kratak opis stanja tehnike u oblasti MEMS senzorskih sistema koji su pogodni za registrovanje kretanja krutog tela u prostoru. Daje se pregled tehnoloških osnova za izgradnju MEMS senzora tipa žiroskopa, akcelerometra i magnetometra.

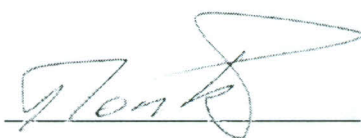
U četvrtom poglavlju se detaljno navodi koncept tehničkog rešenja gde se razmatra ukupna problematika generisanja tripleta ugaonih koordinata kroz korišćenje MEMS žiroskopskog senzora i identifikuje problem akumulacije greške koja nastaje tokom integracije senzorske informacije brzine u cilju dobijanja ugaonog pomeraja. Dalje se razmatra uvođenje senzorske redundanse u obliku akcelerometra, koji ima stabilnu referencu u pravcu normale na Zemljinu površinu – ubrzanje gravitacije i magnetometra koji direktno generiše ugaone koordinate sa kvazi stabilnom referencom Severnog pola. Posebno se navode varijantni modeli fuzije redundantnog skupa devet senzorskih kanala i njihovo svodjenje na triplet ugaonih koordinata u realnom vremenu.

U okviru petog poglavlja navodi se detaljan opis hardvera i softvera razvijenog rešenja, koje u delu hardvera obuhvata: 1)MEMS senzorski modul žiroskopa, 2)MEMS senzorski modul akcelerometra i magnetometra, 3)mikroprocesorski sistem baziran na STM32 mikrokontrolerima za obradu senzorskih signala u realnom vremenu, 4)razvojni sistem za programiranje mikrokontrolera, i 5)akvizicioni sistem baziran na PC računaru. Takođe, daje se detaljni opis analitičke osnove i iz toga izvedenih algoritama koji se implementiraju na mikroprocesorskom sistemu za komunikaciju sa senzorskim modulima i obradu senzorskih informacija u realnom vremenu. Dalje je naveden pregled sprovedenih eksperimentalnih radnji sa ciljem da se praktično verifikuje funkcionalnost i performanse razvijenih algoritama i senzorskog sistema u celini.

U zaključku se navodi da je razvijeni MEMS senzorski sistem 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 vrlo mali obim investicija, predstavlja potentnu platformu za dalji razvoj i istraživanja u oblasti interakcije čoveka i robota i šire, za mnoge druge primene, od upravljanja letećim objektima, pa do treniranja sportista ili praćenja rehabilitacionih procesa u lečenju pacijenata.

MIŠLJENJE

Autori tehničkog rešenja **Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu**, koji je razvijen (koncipiran, projektovan i realizovan samogradnjom) na projektu TR 35007, precizno i kompletno su prikazali kompletnu strukturu, sadržaj i upotrebnu vrednost tehničkog rešenja. Prikazane mogućnosti razvijenog sistema čije su funkcionalne performanse uporedive sa sličnim sistemima vodećih svetskih proizvođača, predstavljaju nov doprinos naučnim i inženjerskim znanjima istraživačke i naučne zajednice Srbije. Sa zadovoljstvom predlažemo Naučno-nastavnom veću Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu da novorazvijeni eksperimentalni sistem: **Inteligentni mikro-elektromehanički senzorski sistem za merenje ugaonih koordinata položaja prostornih objekata u realnom vremenu**, koje su realizovali autori: prof. dr Petar B. Petrović, Ivan Danilov, dipl. inž. maš., Nikola Lukić, dipl. inž. maš., Dušan Nikić, dipl. inž. maš., prihvati kao novo tehničko rešenje, relevantno za korpus tehnoloških znanja Srbije u oblasti mehatronskih sistema i tehnologija.



Prof. dr Janko Hodolič, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad



Prof. dr Radovan Puzović, Mašinski fakultet Univerziteta u Beograd

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 2681/2
ДАТУМ: 26.12.2013.

На основу захтева проф.др Петра Петровића, бр. 2681/1 од 26.12.2013. године и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 26.12.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у оквиру пројекта ТР35007 под насловом: **„Интелигентни микро-електромеханички сензорски систем за мерење угаоних координата положаја просторних објеката у реалном времену“**, чији су аутори: проф.др Петар Петровић, Иван Данилов, дипл.инж.маш., Никола Лукић, дипл.инж.маш. и Душан Никић, дипл.инж.маш., именују:

- проф.др Јанко Ходолич, Факултет техничких наука, Нови Сад
- и
- проф.др Радован Пузовић.

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



ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -
БРОЈ: 22/1
ДАТУМ: 16.01.2014.

На основу захтева проф.др Петра Петровића, бр. 2681/1 од 26.12.2013. године, одлуке о именовану рецензента и чл. 63. Статута Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 16.01.2014. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење рађено у оквиру пројекта ТР35007 под насловом: **„Интелигентни микро-електромеханички сензорски систем за мерење угаоних координата положаја просторних објеката у реалном времену“**, чији су аутори: проф.др Петар Петровић, Иван Данилов, дипл.инж.маш., Никола Лукић, дипл.инж.маш. и Душан Никић, дипл.инж.маш., а позитивну рецензију поднели: проф.др Јанко Ходолич, Факултет техничких наука, Нови Сад и проф.др Радован Пузовић.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА



Проф.др Милорад Милованчевић

