

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Образац 1.

2115/5
(Број захтева)

Већу научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно
Члану 6. и чл. 7 став 1. овог Правилника)

28.11.2013.
(Датум)

ЗАХТЕВ
за давање сагласности на предлог теме докторске дисертације

Молимо да сходно чл. 46. ст.5. тач.3. Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“, број 131/06), дате сагласност на предлог теме докторске дисертације

НАПРЕДНИ АЛГОРИТМИ УПРАВЉАЊА МАНИПУЛАТОРИМА У СИСТЕМИМА ЗА ТРЕНАЖУ
ПИЛОТА САВРЕМЕНИХ БОРБЕНИХ АВИОНА

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Механика

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: ЈЕЛЕНЕ (ЗОРАН) ВИДАКОВИЋ

2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет Београд

3. Година дипломирања: 2009.

4. Назив магистарске тезе кандидата: /

5. Назив Факултета на коме је магистарска теза одбрањена: /

6. Година одбране магистарске тезе: /

7. Назив Факултета на коме је кандидат уписао докторске студије: Машински факултет Београд

Одсек, смер или група: /

Година уписа докторских студија: 2010.

Обавештавамо Вас да је Наставно-научно веће Факултета
(назив надлежног тела Факултета)

на седници одржаној 28.11.2013
размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

Прилог:

1. Предлог теме докторске дисертације са образложењем.

2. Акт надлежног тела факултета о подобности теме за израду докторске дисертације.

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -

Број: 2115/5

Датум: 28.11.2013. године

Београд, Краљице Марије 16

На захтев Јелене Видаковић, дипл.инж.маш., бр. 2115/1 од 28.10.2013. године, извештаја Комисије у саставу: проф.др Михаило Лазаревић, ментор, проф.др Александар Обрадовић и др Владимир Квргић, виши научни сарадник, ЛОЛА Институт Београд број 2115/4 од 22.11.2013. године, а на основу чл. 30 Закона о високом образовању и чл. 30 Правилника о докторским студијама Машинског факултета Универзитета у Београду, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду на седници од 28.11.2013. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се предлог о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације **«НАПРЕДНИ АЛГОРИТМИ УПРАВЉАЊА МАНИПУЛАТОРИМА У СИСТЕМИМА ЗА ТРЕНАЖУ ПИЛОТА САВРЕМЕНИХ БОРБЕНИХ АВИОНА»** докторанта **ЈЕЛЕНЕ ВИДАКОВИЋ**, дипл.инж.маш.

За ментора докторанту Јелени Видаковић, именује се **проф.др Михаило Лазаревић**.

Одлуку доставити: Већу Научних области техничких наука Универзитета у Београду на сагласност, ментору и архиви.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Милорад Милованчевић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Јелене Видаковић, дипл. маш. инж., студента докторских студија за израду докторске дисертације која је поднета од стране кандидата и заведена под бројем: 2115/1, дана 28.10. 2013.

На основу пријаве кандидата, сагласности Катедре за Механику, број 2115/2, 11.2013 и одлуке Наставно-научног већа Машинског факултета Универзитета у Београду број 2115/3 од 14.11.2013, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Јелене Видаковић, дипл. инж. маш., студента докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме

Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Кратка биографија аутора

Кандидат Јелена Видаковић, дипл. инж. маш., рођена је 3.7. 1982. године у Гњилану, Република Србија. Основну школу као и гимназију завршила је у Ужицу. На машинском факултету у Београду, дипломирала је 2009. године на одсеку за Аутоматско управљање. Од школске 2010/11. године, кандидаткиња је студент докторских студија на Машинском факултету у Београду.

Од марта 2010. године, кандидаткиња је запослена као истраживач у истраживачко-развојном институту Лола, у Сектору за роботiku.

Активно се служи рачунаром и познаје све програме из пакета Ms Office, Latex, софтверске пакете Adobe Illustrator, AutoCad као и програмске језике Matlab, Simulink, Mathematica, Octave, C.

Течно говори, чита и пише енглески језик.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат Јелена З. Видаковић, дипл. маш. инж., уписала је докторске студије на Машинском факултету у Београду школске 2010/11 године и положила све испите предвиђене наставним планом и програмом групе за Механику на Машинском факултету у Београду остваривши просечну оцену студија **9,77 (девет и 77/100)**.

Детаљан преглед номенклатура одслушаних и положених испита, дата је у *Табели бр. 1*.

ESPВ	Прва година		Друга година	
	I семестар	II семестар	III семестар	IV семестар
5	Виши курс математике оцена: 10 (deset)	Одабрана поглавља из механике оцена: 10 (десет)	Напредна роботика-изабрана поглавља оцена: 10 (десет)	Припрема за пријаву докторске дисертације
5	Нумеричке методе оцена: 10 (десет)	Динамика система крутих тела оцена: 10 (десет)	Моделирање и симулација система индустријских робота оцена: 10 (десет)	Лабораторија 4 (истраживање и публиковање за дисертацију) оцена: 9(девет)
5	ОМНИР и комуникације оцена: 10 (deset)	Управљање кретањем механичких система оцена: 9(девет)	Лабораторија 3 (истраживање и публиковање за дисертацију) оцена: 9 (девет)	
5	Основе рачуна нецелобројног реда са применама у инжењерству оцена: 10 (десет)	Лабораторија 2 (истраживање и публиковање за дисертацију) оцена: 10 (десет)		
10	Лабораторија 1 (истраживање и публиковање за дисертацију) оцена: 10 (десет)			
Укупно ESPВ	5+5+5+5+10=30	5+5+5+15=30	5+5+20=30	5+25=30
Просечна оцена	9,77 (девет и 77/100)			

Табела бр. 1.

У том смислу кандидат је положио 4 обавезна, 5 изборних предмета и 4 предмета везана за лабораторијска истраживања која су реализована публиковањем радова на конференцијама и у часописима.

Кандидат Јелена З. Видаковић, дипл. маш. инж. је као аутор или коаутор објавила, до сада, 1 рад у водећем научном часопису међународног значаја, 1 рад у научном часопису међународног значаја, 3 рада у часописима међународног значаја верификованих посебном одлуком Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, 1 рад у часопису националног значаја, 1 рад у међународним часописима без категорије, као и 13 радова који су саопштени и објављени у зборницима конференција међународног значаја.

Кандидат Јелена З. Видаковић, дипл. маш. инж. успешно је одбранила пројекат докторске дисертације на тему *Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона*, чиме је заокружила своја знања из области која се директно односе на проблематику будуће докторске дисертације, дала је квалитативан хронолошки преглед до сада постигнутих резултата у области истраживања и сачинила концепт структуре своје дисертације.

Кандидат је такође ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, под називом *Развој уређаја за тренинг пилота и динамичку симулацију лета борбених авиона и то 3-осне центрифуге и 4-осног уређаја за просторну дезоријентацију пилота*, Ев. Бр. ТР35023, пројекат финансиран од стране Министарства за просвету, науку и образовање Републике Србије за период 2011-2014.

Списак објављених радова и других релевантних резултата који опредељују кандидата за рад на предложеној теми:

Рад у водећем научном часопису међународног значаја (M21)

- [1] Vladimir Kvrđić, Zoran Dimić, Vojkan Cvijanović, Jelena Vidaković, Natasa Kablar, „A control algorithm for improving the accuracy of five-axis machine tools“, International Journal of Production Research, 2013, (DOI:10.1080/00207543.2013.858194, ID: 858194), Impact factor 2012: 1.460.

Рад у научном часопису међународног значаја (M23)

- [2] Goran Ferenc, Zoran Dimić, Maja Lutovac, Jelena Vidaković, Vladimir Kvrđić, “Open Architecture Platforms for the Control of Robotic Systems and a Proposed Reference Architecture Model”, Transactions of FAMENA, Vol. 37, No. 1, 2013, ISSN 1333-1124, UDC 004.45:004.896, pp. 89-100, Impact factor 2012: 0.232

Радови у часописима међународног значаја верификовани посебном одлуком Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (M24)

- [3] Jelena Vidaković, Vladimir Kvrđić, Zorana Dančuo, Maja Lutovac, Mihailo Lazarević “Comparison of numerical simulation models for open loop flight simulations in human centrifuge”, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 84th Annual Meeting

- of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, GAMM 2013, Novi Sad, Serbia, March 18-22, 2013.
- [4] Zorana Dančuo, Bosko Rašuo, Vladimir Kvrđić, Jelena Vidaković, Mirko Bućan “*On Mechanics of a High-G Human Centrifuge*”, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 84th Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics, GAMM 2013, Novi Sad, Serbia, March 18-22, 2013.
 - [5] Jelena Vidaković, Mihailo Lazarević, Vladimir Kvrđić, Zorana Dančuo, Goran Ferenc “*Advanced Quaternion Forward Kinematics Algorithm Including Overview of Different Methods for Robot Kinematics*”, FME Transactions- 2013, (accepted).

Научни радови саопштени на скуповима међународног значаја, штампани у целини (МЗЗ)

- [6] Jelena Vidaković, Vladimir Kvrđić, Goran Ferenc, Zorana Dančuo, Mihailo Lazarević, “*Kinematic and Dynamic Model of the Human Centrifuge*”, 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 4-7th June, 2013, Vrnjačka Banja, 627-632.
- [7] Zorana Dančuo, Vladimir Kvrđić, Bosko Rašuo, Jelena Vidaković “*On Dynamics of a Spatial Disorientation Trainer for Pilot Training*”, 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 4-7th June, 2013, Vrnjačka Banja, 627-632.
- [8] Maja Lutovac, Vladimir Kvrđić, Goran Ferenc, Zoran Dimić, Jelena Vidaković, “*3D Simulator for Human Centrifuge Motion Testing and Verification*”, Mediterranean Conference on Embedded Computing 2013, ISBN 978-9940-9436-1-5, 160-163.
- [9] Jelena Vidaković, Vladimir Kvrđić, Goran Ferenc, Zorana Dančuo, Mihailo Lazarević, “*Control of a Human Centrifuge*”, 29th Danubia-Adria Symposium 2012, ISBN 978-86-7083-762-1, 186-189.
- [10] Goran Ferenc, Maja Lutovac, Jelena Vidaković, Zoran Dimić, Vladimir Kvrđić, “*Real-Time Robot Control Logic Using Modular FSM*”, International Conference Management of Technology - Step to Sustainable Production 2012, ISBN 1847-6880, 259-265.
- [11] Goran Ferenc, Maja Lutovac, Jelena Vidaković, Zoran Dimić, Vladimir Kvrđić, “*Benefits of Using Open Architecture for Real-Time Control of Robots and Multi-Axis Machining Systems*”, International Conference Management of Technology - Step to Sustainable Production 2012, ISBN 1847-6880, 266-273.
- [12] Zorana Dančuo, Bosko Rašuo, Vladimir Zeljković, Jelena Vidaković, Vladimir Kvrđić “*Accelerations in a High Performance Human Centrifuge*” 29DA Symposium on Advances in Experimental Mechanics ISBN 978-86-7083-762-1, 186-189. 26.09.-29.09.2012 Belgrade, (2012)
- [13] Jelena Vidaković, Vladimir Kvrđić, Mihailo Lazarević, Goran Ferenc, Maja Lutovac, “*Kinematički model humane centrifuge*”, 56. konferencija ETRAN 2012, ISBN 978-86-80509-67-9, RO1.4-1-4.
- [14] Zorana Dančuo, Jelena Vidaković, Goran Ferenc, Maja Lutovac, Vladimir Kvrđić, “*Modeling a Human Centrifuge as Three-DoF Robot Manipulator*”, Mediterranean Conference on Embedded Computing 2012, ISBN 978-9940-9436-0-8, 149-152.
- [15] Maja Lutovac, Zoran Dimić, Goran Ferenc, Jelena Vidaković, Mirko Bućan, “*Virtuelni robot u distribuiranom upravljačkom sistemu*”, 20th Telecommunications forum TELFOR 2012, ISBN 978-1-4673-2984-2, 1401-1404.
- [16] Jelena Vidaković, Goran Ferenc, Maja Lutovac, Vladimir Kvrđić, “*Development and Implementation of an Algorithm for Calculating Angular Velocity of Main Arm of Human Centrifuge*”, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition 2012, ISBN 978-1-4673-1971-3, DS2a.17-1-6.

- [17] Vladimir Kaplarević, Marija Milićević, Jelena Vidaković, Vladimir Kvrđić, “*New approach for designing robot programming system based on L-IRL programming language*”, DEMI 2011-10th Anniversary International Conference on accomplishments on in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, 26-28. maj 2011, Banja Luka, 873-876, ISBN 978-99938-39-36-1
- [18] Vladimir Kvrđić, Jelena Vidaković, Vladimir Kaplarević, Mihailo Lazarević, “*Forward and Inverse Kinematics for vertical 5-axis turning center with angular head of non-intersectional axes, with compensatin for table moving caused by thermal dilatation*”, The Third International Congress of Serbian Society of Mechanics, 5-8. Jul 2011, Vlasinsko jezero, 574-589, ISBN 978-86-909973-3-6

Радови у часописима националног значаја (M52)

- [19] Zorana Dančuo, Boško Rašuo, Vladimir Kvrđić, Jelena Vidaković, Nemanja Džinić, „*Kinematska analiza uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota*” Tehnika-Mašinstvo ISSN 0040-2176 (Savez inženjera i tehničara Srbije)

Радови у научним часописима без категорије

- [20] Maja Lutovac, Goran Ferenc, Vladimir Kvrđić, Jelena Vidaković, Zoran Dimić, “*Robot Programming System Based on L-IRL Programming Language*”, Acta Technica Corviniensis – Bulletin Of Engineering, Tome V, Fascicule 2, 2012, ISSN 2067-3809, 27-30.

Сагласно програму за докторске студије кандидат је са положеним испитима, истраживањима, публикованим радовима и лабораторијским радом остварио потребан број бодова и уписао трећу годину, чиме је испунио услов за пријаву докторске дисертације.

1.3 Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат је својим досадашњим стручним и истраживачким активностима у периоду од 2010. до 2013. године испољио висок степен заинтересованости, одговорности и стручности за инжењерски и научни рад, као и спремност за решавање нових истраживачких задатака.

Публиковани и изложени радови у часописима и на конференцијама међународног и националног значаја указују на смисао кандидата да се бави научно – истраживачким радом.

Досадашњи објављени радови и истраживачка делатност кандидата су суштински повезани са научном облашћу којој припада тема предложене докторске дисертације и квалификује кандидата за даљи успешан рад на предложеној теми.

На основу изложених биографских података, положених испита на докторским студијама, научних и стручних активности, објављених радова и истраживања Комисија закључује се да кандидат испуњава све потребне услове за приступање изради докторске дисертације и очекује да резултати истраживања дају одговарајући научни допринос у областима примењене механике.

2. Предмет и циљ истраживања

Роботика је мултидисциплинарна наука која доживљава интензиван развој од половине прошлог века када први роботи почињу да се користе у индустријске сврхе. Од тада она налази све већу примену у готово свим индустријским гранама, али и у другим областима. Значај индустријске роботике се пре свега огледа у аутоматизацији производње, подизања нивоа продуктивности, повећавања нивоа квалитета и хуманизације рада. Технологије и методологије које се развијају у склопу индустријске роботике проналазе примене и у другим гранама инжењерства. Поред типичних употреба у операцијама заваривања, монтаже, манипулације, јављају се и потребе за многим другим апликацијама. У оквиру потребе за уређајима за тренажу пилота и динамичку симулацију лета савремених борбених авиона, роботски манипулатори су нашли своју примену и у војној ваздухопловној медицини.

С обзиром да се роботски механизми суштински развијају ради остваривања жељених кретања, кинематика робота представља незаобилазни предмет анализе, управљања и симулације у роботизици. Посебан акценат у проучавању кинематике робота је на геометрији структуре роботског система који је моделован као кинематички ланац са више степени слободе. Кинематички ланац је скуп крутих тела-чланова која су међусобно повезана зглобовима који обезбеђују ротацију или транслацију чланова при чему се на почетку ланца налази база робота, а на крају ланца је завршни уређај (*end-effector*). Да би се робот кретао у тродимензионалном простору где обавља одређене задатке, потребно је управљати позицијом и оријентацијом завршног уређаја. Због тога је неопходно одредити везу између параметара зглобова робота и позиције и оријентације завршног уређаја. Постоје два основна проблема кинематике робота: проблем директне и инверзне кинематике. Проблем директне кинематике се односи на одређивање позиције и оријентације завршног уређаја робота у функцији од задатих унутрашњих координата робота. Проблем инверзне кинематике се односи на одређивање вредности унутрашњих координата које ће дати жељену позицију и оријентацију завршног уређаја робота. Постоји више конвенција за дефинисање међусобног положаја чланова роботског система од којих су најпознатије Денавит-Хартенберг конвенција, Родригов приступ итд. Поред ових конвенција где се дефинисање кинематичких алгоритама даје најчешће у простору Декартових координата, они се могу дефинисати и у простору кватерниона. Иако је моделирање у простору Декартових координата далеко популарније у роботизици, предности моделовања кинематике у простору кватерниона се огледају пре свега у нумеричкој стабилности и мањој сложености алгоритама, непостојању сингуларитета који се јављају код Ојлерових углова, једнозначности решења, већој тачности при интеграцији малих инкременталних промена у оријентацији што ће бити и предмет истраживања у оквиру ове докторске дисертације.

При развоју система за управљање роботских манипулатора високих перформанси, неопходно је укључити динамички модел роботског система. Динамички модел се може користити за рачунарску симулацију понашања роботског система. Испитивањем понашања модела у различитим режимима рада могуће је предвидети како ће се роботски систем понашати када буде израђен.

Такође, предмет планираних истраживања односи се и на коришћење динамичког модела за развој управљачких алгоритама који се могу имплементирати на *off-line* део система за управљање кретањем робота, као и на део система који врши управљање у реалном времену. Развој динамичког модела омогућава одређивање сила и момената у зглобовима које су неопходне да би се извршило димензионисање сегмената, актуатора, лежајева итд. при развоју роботског система. До скоро је била пракса да су управљачки

системи роботских манипулатора били базирани само на коришћењу кинематичких модела, међутим код машина које развијају велике брзине (*high-speed* машине), савремени софистицирани робот контролери укључују и динамички модел да би се остварила оптимална перформанса. У оквиру развоја управљачих алгорита, потребно је одредити моменте и силе који остварују задату трајекторију робота. Развој што ефикаснијег оваквог алгорита (са што мањом сложеностју) је врло важан због управљања у реалном времену. За одређивање диференцијалних једначина кретања, тј. динамичког понашања користи се неколико метода. Један приступ се заснива на примени основних теорема динамике-закона о промени количине кретања и момента количине кретања материјалног система („Њутн-Ојлеров приступ“). Други приступи се заснивају на употреби Даламберовог или Хамилтоновог принципа. Такође, могу се користити Лагранжове једначине кретања друге врсте или Кејнове једначине. Једна од предности примене Лагранжових једначина је мања сложеност (*computational cost*) алгорита, с обзиром да он не узима у обзир реакције веза. Предност „Њутн-Ојлеров“ поступка огледа се у томе што омогућава развој динамичког модела у рекурзивној форми, а такође овом методом се могу одредити и силе и реакције у зглобовима које су неопходне при димензионисању.

У оквиру потребе за извршење тренаже пилота модерних борбених авиона, намеће се потреба за развојем манипулатора високих перформанси. Наиме, борбени авиони последње генерације се одликују особином суперманеврабилности и пилоти су изложени изузетно великим вредностима убрзања услед којих им је смањена способност управљања летелицом. Чак се може појавити и губитак свести проузрокован високим G оптерећењем тзв. $G\text{-LOC}$ (*G-force induced Loss Of Consciousness*). Хумана центрифуга пружа безбедно и веродостојно окружење за обуку и тренинг пилота борбених авиона на G оптерећење. Овај уређај се моделира и управља као 3-осни манипулатор са ротационим осама. Основно кретање је обртање руке око вертикалне осе која носи кардански улежиштену гондолу, обртну око 2 осе које се секу на седишту пилота. Основна намена центрифуге је тестирање и оцењивање индивидуалних способности пилота и његово привикавање на велика гравитациона оптерећења као и извођење физиолошких испитивања и тестирања материјала. С обзиром на велика убрзања која центрифуга развија, она се сврстава у ред манипулатора високих перформанси. Поред $G\text{-LOC}$ -а, феномен познат као просторна дезоријентација представља велики проблем пилота при управљању летелицом. За навикавање пилота на необичне положаје користи се уређај за просторну дезоријентацију пилота. Овај уређај представља 4-осни манипулатор са ротационим осама, од којих се три секу на седишту, док је четврта вертикална и служи за ротацију жirosкопски улежиштене кабине. Овај уређај може да симулира било који правац вектора G оптерећења које делује на пилота током лета.

Управљачки систем манипулатора састоји се од софтвера за управљање роботима који укључује планер путање са интерполатором и инверзном кинематиком, серво механизма, комуникационих веза и помоћних уређаја. При томе, савремени електромотори са својим серворегулаторима и преносницима остварују задате моменте (силе) и брзине чланова робота. Задавање жељених брзина чланова робота, односно мотора који их покрећу, у току сваког периода интерполације врше контролери роботских манипулатора преко управљачких напона уколико се ради о аналогним регулаторима, односно цифарски уколико је реч о дигиталном регулатору. У последње време мотори са дигиталним регулаторима су потпуно потиснули моторе са аналогним регулаторима. Планер путање у *off-line* режиму управљања даје информације о жељеним вредностима брзина мотора за сваки период интерполације. Код манипулатора високих перформанси код којих се остварују велике брзине и убрзања чланова робота, а које одликују велики моменти инерције, поред регулације коју остварују серворегулатори мотора, неопходно је укључити додатни сервомеханизам

који врши управљање у реалном времену. Иако су до сада развијене различите методе управљања, ПИД регулатори су широко распрострањени у индустријским апликацијама због своје једноставне архитектуре и једноставне хардверске и софтверске имплементације. На основу повратне информације о позицији мотора која се добија са мерног уређаја (енкодера), у току сваког периода одабирања (који је мањи од периода интерполације), ПИД регулатор који задаје вредност брзине која се шаље серворегулатору мотора, на основу одговарајућег алгоритма може да коригује задату вредност брзине мотора. С обзиром да се ради о манипулаторима високих перформанси, неопходно је да овај алгоритам буде напредан, како би се остварило робусно управљање што представља такође предмет планираних истраживања у оквиру ове докторске дисертације.

У том смислу, поред пројектовања класичног ПИД регулатора, потребно је и размотрити и примену рачуна нецелобројног реда. Рачун нецелобројног реда (*fractional calculus*) се последњих деценија све више примењује у моделирању и анализи својстава динамике механичких система, управљању, стабилности, опису конститутивних релација савремених материјала и структура са својствима вискоеластичности, у биомедицинском инжењерству и др. У математичком смислу, за разлику од „класичног“ диференцијалног и интегралног рачуна, овде степен може бити реалан односно комплексан број, тако да су одговарајући оператори диференцирања и интеграљења нелокални оператори и дати системи се сад могу описати са диференцијалним једначинама али нецелобројног реда тако да систем има више степени слободе. У специјалном случају када је степен целобројан онда се претходни оператори свode на „класичне“ операторе диференцирања и интеграљења. На основу досадашњих теоретских и експерименталних истраживања, она су доказала предност математичких модела и ПИД регулатора нецелобројног реда у којима се примењује рачун нецелобројног реда у односу на математичке моделе који користе класичну математичку анализу са целобројним изводима и интегралима. Пошто ПИД регулатор нецелобројног реда осим одговарајућих појачања има подешљиве и редове диференцирања и интеграљења, јасно је да даје веће могућности за управљање и да је конвекционални ПИД регулатор само посебан случај ПИД регулатора нецелобројног реда. При томе, употребом регулатора нецелобројног реда могуће је остварити много бољу регулацију односно управљање датим системом (знатно мањи прескок, време смирења итд.).

Предмет ове докторске дисертације је развој напредних алгоритама управљања и моделирање и симулација система за тренажу пилота и динамичку симулацију лета савремених борбених авиона и то троосне хумане центрифуге и четворосног уређаја за просторну дезоријентацију пилота. Овај рад представља део развоја ових уређаја у Лола Институту.

Кинематички модели биће развијени применом Денавит-Хартенберг методе и Родриговим приступом. Поред ових модела, биће развијен и напредни алгоритам за директну и инверзну кинематику ових уређаја у простору кватерниона имајући у виду наведене предности овог поступка. Овај алгоритам ће наћи примену и на манипулаторе који имају више оса од овде разматраних. Такође, у циљу остваривања оптималних перформанси при управљању и за потребе симулације рада уређаја, биће развијен динамички модел ових уређаја употребом Њутн-Ојлерове и Лагранжове методе.

Биће развијен и имплементиран планер путање хумане центрифуге који ће укључивати алгоритме кинематике и динамике, као и специфичне функционалности везане за управљање G оптерећењима (*acceleration forces*) које делују на пилота. Ове специфичне функционалности остварене су алгоритмом управљања који у режиму отворене петље остварује линеарну промену укупног G оптерећења које делује на пилота. Другим речима, овај алгоритам извршава управљање трзајем (*jerk*). Укупно оптерећење које делује на пилота се добија одговарајућим алгоритмом управљања

брзином планетарне осе центрифуге, а силе у правцу G_x , G_y и G_z осе се добијају закретањима „рол“ прстена и гондоле центрифуге по одговарајућем алгоритму. Да не би дошло до сувише наглих промена оптерећења пилота при промени профила оптерећења, алгоритам заглађивања профила оптерећења ће бити развијен. Планер путање хумане центрифуге ће бити имплементиран у *off-line* јединицу система за управљање кретањем роботима. Програмски језик за програмирање робота Л-ИРЛ (*Lola-Industrial Robot Language*) биће проширен инструкцијама кретања које се односе на задавање профила оптерећења којима се симулирају услови лета савремених борбених авиона.

Ради задавања необичних положаја пилота, алгоритми директне и инверзне кинематике уређаја за просторну дезоријентацију пилота биће имплементирани у већ постојећи планер путање за управљање кретањем манипулатора.

Неком од метода подешавања биће извршено пројектовање параметра ПИД регулатора додатног сервомеханизма којим се задаје брзина мотора која се шаље серворегулатору мотора, а на основу повратне информације о стварној вредности позиција добијених са енкодера. Биће развијен напредни алгоритам којим овај ПИД регулатор коригује задату вредност брзине мотора у сваком периоду одабирања. Такође, неком од постојећих метода и/или путем оптимизације биће реализовано подешавање параметара ПИД регулатора нецелобројног реда који у општем случају има пет параметара за подешавање што свакако представља изазован задатак. Међутим, очекује се да ће овакав регулатор омогућити остваривање „глаткијег“ кретање чланова манипулатора.

Затим ће бити спроведена анализа, односно поређење предложених контролера. ПИД регулатор који буде показао боље перформансе биће имплементиран на део управљачког система роботског манипулатора који врши управљање у реалном времену.

Тежња савремене производне технологије је из првог покушаја добити производ који је исправан, у најкраћем могућем року, уз најмање трошкове. У том смислу, уместо развоја и тестирања физичких прототипова, модерни развојни процеси укључују технологије развоја виртуелних прототипова у циљу смањења трошкова и времена развоја. На основу развијеног кинематичког и динамичког модела, пројектованог ПИД регулатора, за параметре специфицираног мотора у оквиру виртуелних модела ових уређаја ће на основу параметара добијених из CAM/CAD/CAE комерцијалног софтвера бити извршена симулација понашања датог уређаја. Кроз ове виртуелне моделе биће анализирана интеракција између робот контролера и манипулатора ради остварења оптималних перформанси манипулатора.

На крају ће бити извршена експериментална верификација и тестирање алгоритама у лабораторијским условима, на моделима уређаја.

У складу са предметом истраживања, циљеви истраживања у оквиру докторске дисертације су

- Анализа методологија и алгоритама управљања у роботизи, анализа праваца истраживања у савременој роботизи са посебном пажњом на индустријске роботе.
- Проучавање алгоритама кинематике, динамике и управљања уређаја за тренажу пилота и динамичку симулацију лета савременог борбеног авиона са посебним освртом на троосну центрифугу и четвороосни уређај за просторну дезоријентацију пилота. Анализа функционалних захтева поменутих техничких система, одговарајућих изведених решења и варијантних решења везаних за избор оптималног концепта у управљању, идентификацију и класификацију технолошких задатака значајних за развој.

- Дефинисање алгоритама управљања на основу уочених специфичности у кинематици и динамици наведених уређаја са аспекта роботике.
- Дефинисање алгоритама управљања G оптерећењем која делују на пилота, а којим се остварује промена трзаја, у хуманој центрифуги у режиму отворене петље.
- Унапређење сервомеханизма који врши кориговање задатих брзина управљаних мотора у реалном времену.
- Прилог моделирању разматраних роботских система и извођење симулација. При изради модела ће бити коришћене модерне софтверске технологије. Кроз симулацију виртуелног модела, очекује се добијање оптимизованих решења.
- Експериментална верификација и тестирање у лабораторијским условима на моделима ових уређаја.

Извод из литературе релевантне за предмет истраживања

- [1] Levin B., Kiefer D. (2002) Dynamic Flight Simulator for Enhanced Pilot Training, *SAFE Europe*
- [2] Chen Y. C., Repperger D. W. (1995) A study of the kinematics, dynamics and control algorithms for a centrifuge motion simulator, *Proceedings of the American Control Conference*, Seattle, Washington, June 21-23, 1995, pp. 1901-1905.
- [3] Tsai, M. H., and M. C. Shih. "G-load tracking control of a centrifuge driven by servo hydraulic systems." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 223.6 (2009): 669-682.
- [4] Čović V., Lazarević M., (2009) Mechanics of Robots, University of Belgrade *Faculty of Mechanical Engineering*
- [5] Kvrđić V. (1998) Development of intelligent system for management and programming of industrial robots (in Serbian), PhD dissertation, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- [6] Siciliano, Bruno, and Oussama Khatib, eds. *Springer handbook of robotics*. Springer, 2008.
- [7] Paul, Richard P. *Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators*. Richard Paul, 1981.
- [8] Tsai, Lung-Wen. *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. Wiley. com, 1999.
- [9] Gouasmi, Mahmoud. "Robot Kinematics, using Dual Quaternions." *IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA)* 1.1 (2012): 13-30
- [10] Diebel, James. "Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors." *Matrix* (2006).
- [11] Liu, G. P., and S. Daley. "Optimal-tuning PID control for industrial systems." *Control Engineering Practice* 9.11 (2001)
- [12] Suh, Suk-Hwan. *Theory and design of CNC systems*. Springer, 2008.
- [13] Chiacchio, Pasquale, et al. "Robust design of independent joint controllers with experimentation on a high-speed parallel robot." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 40.4 (1993): 393-403.
- [14] Edited by Mihailo Lazarević, *Advanced topics on applications of fractional calculus on control problems, system stability and modeling*, ID 9028, WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY PTE LTD, 2013
- [15] M. Lazarević, S. Batalov, T. Latinovic, 2013. *Fractional PID Controller Tuned by Genetic Algorithms for a Three DOF's Robot System Driven by DC motors*, 6th Workshop on Fractional Differentiation and Its Applications IFAC Joint Conference SSSC Grenoble, France, February 4-6, pp. 380-385.
- [16] Podlubny, I.: *Fractional Differential Equations*. Academic Press, San Diego, 1999.
- [17] K. Astrom and T. Hagglund. *PID controllers: Theory, design, and tuning*. Instrument Society of America, North Carolina, 1995.
- [18] Monje C.A., et al., *Fractional-order Systems and Controls*, Springer-Verlag, London, 2010.

3. Полазне хипотезе

Хипотезе специфичне за предмет истраживања су:

1. Дати манипулатори се разматрају као системи крутих тела са коначним бројем степени слободе кретања који су моделирани у виду отвореног кинематичког ланца.
2. Иако су чланови ових манипулатора у некој мери деформабилни, моделирање и динамичка анализа са еластичним члановима неће бити разматрана. При развоју кинематичких и динамичких модела, сматра се да су еластичне деформације чланова занемарљиво мале.
3. Дефинисањем одговарајућих математичких модела и решавањем система једначина аналитичким и нумеричким методама одређује се тачно и апроксимативно понашање система на кинематичком тако и на динамичком нивоу.
4. Манипулатори о којима је реч користе комерцијално доступне АС или ДС моторе са својим регулаторима код којих је могуће задавати управљачки сигнал брзине или момента, али не и оба истовремено. Овде се разматра управљање по брзини, односно позицији, без експлицитног задавања момената током управљања у реалном времену.
5. При употреби дискретизационих метода за решавање диференцијалних једначина кретања и синтезе одговарајућих алгоритама управљања, подразумева се да је у току периоде одабирања угаона брзина мотора константна.

4. Научне методе истраживања

Научне методе које ће се примењивати у оквиру ове докторске дисертације су:

- Методе моделирања, анализе дате класе роботских манипулатора високих перформанси
- Методе теоријског испитивања/анализе дате класе роботских система (метода Денавит-Хартенберг, Родригов приступ као и кватернионски приступ као при дефинисању међусобног односа положаја чланова манипулатора).
- Аналитичке и нумеричке методе за решавање диференцијалних једначина кретања. Нумеричке методе биће развијане уз пратеће софтверске алате.
- Савремене методе синтезе дигиталног управљања уз примену подешавања параметара ПИД регулатора којим се задаје брзина мотора.
- Напредне дискретизационе технике при дефинисању параметара ПИД регулатора којим ће бити остварен напредан сервомеханизам за кориговање брзине управљаних мотора.
- Савремене методе теорије управљања које укључују методе подешавања и методе оптимизације засноване на рачуну нецеобројног реда параметара ПИД регулатора којим се коригују брзине мотора.

- Методе виртуелног пројектовања.

5. Очекивани научни допринос

Реализацијом циљева докторске дисертације применом поменутих метода, очекује се да добијени резултати представљају оригинални допринос и да имају научни и практични значај. С обзиром да се хумана центрифуга, због високих вредности брзина и убрзања који мотори развијају као и због великих маса и инерција чланова, сматра манипулатором високих перформанси, напредни алгоритми управљања који ће бити развијени даће допринос који ће имати примену на широк спектар оваквих манипулатора. Према постављеним хипотезама очекивани научни резултати истраживања су:

- Напредни алгоритам директне и инверзне кинематике заснован на кватернионском приступу ће имати универзалну примену на манипулаторе са више степени слободе од ових који су предмет ове дисертације. Предност дефинисања ових алгоритама за системе са више степени слободе огледа се у нумеричкој стабилности и мањој сложености алгоритама, непостојању сингуларитета који се јављају код Ојлерових углова, једнозначности решења, већој тачности при интеграцији малих инкременталних промена у оријентацији.
- Укључивањем динамичког модела, алгоритам управљања моторима којима се остварују задати профили оптерећења омогућиће оптималне перформансе код манипулатора код којих мотори развијају велике брзине и убрзања.
- Кроз развој алгоритма управљања G оптерећењем који делује на пилота, оствариће се управљање по трзају. Овај напредни алгоритам управљања, наћи ће примену и код многих других манипулатора високих перформанси.
- Очекује се да унапређени сервомеханизам за кориговање задатих брзина мотора остварује робусно управљање којим се постиже глатко кретање чланова манипулатора при изузетно захтевним кинематичким и динамичким трајекторијама.
- Приликом укључивања кинематичког, динамичког модела, управљачких алгоритама и параметара пројектованих ПИД регулатора којима се задају жељене брзине мотора у виртуелни модел, очекује се развој метода које ће имати универзалну примену при изради виртуелних прототипова манипулатора.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања састоји се од следећих фаза:

- Преглед литературе везане за изведена решења ових уређаја
- Извођење кинематичких модела ових манипулатора
- Извођење динамичких модела ових манипулатора
- Развијање планера путање хумане центрифуге
- Имплементација кинематичког модела уређаја за просторну дезоријентацију пилота у планер путање постојећег система за управљање и програмирање робота
- Пројектовање параметара ПИД регулатора којим ће бити унапређен постојећи сервомеханизам за задавање брзине управљаних мотора
- Пројектовање параметара ПИД регулатора нецелобројног реда
- Укључивање развијених модела и управљачких алгоритама у виртуелни модел ових уређаја
- Експериментална верификација и тестирање у лабораторијским условима на моделима ових уређаја

Општа структура рада предложене дисертације би могла да буде следећа:

1. Увод
2. Преглед литературе за изведена решења ових уређаја
3. Кинематички модели
4. Динамички модели
5. Планер путање хумане центрифуге
6. Унапређење сервомеханизма којим се задају брзине мотора на основу информација о достигнутој позицији
7. Симулација виртуелног модела
8. Закључак
9. Литература
10. Прилози

7. Закључак и предлог

Анализом релевантних података из пријаве кандидата Јелене Видаковић, Д38/10, Комисија закључује да је предложена тема актуелна и подобна за израду докторске дисертације, као и да кандидат испуњава све законом предвиђене услове и истраживачке способности за рад на докторској дисертацији.

Имајући у виду све наведено Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да кандидату

Јелени З. Видаковић, дипл. инж. маш., - Д 38/10

одобри израду докторске дисертације под називом:

Напредни алгоритми управљања манипулаторима у системима за тренажу пилота савремених борбених авиона

која припада области техничких наука: **машинство.**

За **ментора** за рад на дисертацији предлаже се проф. др **Михаило П. Лазаревић**, редовни професор на Катедри за Механику Машинског факултета Универзитета у Београду.

Београд, 19.11. 2013. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ :

Др **Михаило П. Лазаревић**, редовни
професор, **ментор**, Универзитет у Београду,
Машински факултет

Др **Александар Обрадовић**, редовни професор,
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др **Владимир Квргић**, виши научни сарадник,
ЛОЛА Институт, Београд

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

за кандидата Јелену Видаковић, MSc, студента докторских студија

Име и презиме ментора: др Михаило П. Лазаревић

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. **M.Lazarević**, Finite Time Stability Analysis of PD^α Fractional Control of Robotic Time Delay Systems, *Journal of Mechanics Research Communications*, Vol. 33, Iss.2, March-Apr., 2006, pp.269-279, (ISSN: 0093-6413; IF=1.273)
2. Spasić A., **M. Lazarević**, A new approach to the phenomena at the interfaces of finely dispersed systems, *Journal of Colloid and Interface Science*, 316, (2007), pp.984-995, (ISSN: 0021-9797; IF=3.07)
3. **M.Lazarević**, A.Spasić, Finite-Time Stability Analysis of Fractional Order Time Delay Systems: Gronwall's Approach, *Mathematical and Computer Modelling*, 2009, 49, (2009), pp.475-481, (ISSN: 0895-7177 ; IF=1.346)
4. Miljković, Z., Mitić, M., **M.Lazarević**, Babić, B., Neural Network Reinforcement Learning for Visual Control of Robot Manipulators, *Journal Expert Systems with Applications*, pp.1721-1736, 2013, Elsevier. (ISSN 0957-4174; IF=2.203).
5. M.Živanović, **M.Lazarević**, Using the Decomposition Principle to Stabilize the Nominal Motion of a Mechanical System with Given Accuracy, *Automation and Remote Control*, 2012, Vol.73, No12, 2012, pp.2001-2020, (ISSN: 0005-1179; IF=0.246).

Заокружити одговарајућу опцију (А, Б, В или Г):

А) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији техничко-технолошких, природно-математичких и медицинских наука ментор треба да има најмање три рада са SCI, SSCI, AHCI или SCIE листе, као и Math-Net.Ru листе.

Б) У случају менторства дисертације на докторским студијама у групацији друштвено-хуманистичких наука ментор треба да има најмање три рада са релевантне листе научних часописа (Релевантна листа научних часописа обухвата SCI, SSCI, AHCI и SCIE листе, као и ERIH листу, листу часописа које је Министарство за

науку класификовало као М24 и додатну листу часописа коју ће, на предлог универзитета, донети Национални савет за високо образовање. Посебно се вреднују и монографије које Министарство науке класификује као М11,М12,М13,М14,М41 и М51.)

В) У случају израде докторске дисертације према ранијим прописима за кандидате који су стекли академски назив магистра наука ментор треба да има пет радова (референци) које га, по оцени Већа научних области, квалификују за ментора односне дисертације.

Г) У случају да у ужој научној области нема квалификованих наставника, приложити одлуку Већа докторских студија о именовању редовног професора за ментора.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Датум 20.11.2013.

М.П.
