

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

1980/4
(Број захтева)Већу научних области техничких наука
(Назив стручног већа коме се захтев упућује, сагласно
Члану 6. и чл. 7 став 1. овог Правилника)09.11.2017.
(Датум)

З А Х Т Е В
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

**НАПРЕДНО МОДЕЛОВАЊЕ СЛОЖЕНИХ РОБОТСКИХ СИСТЕМА И МЕХАНИЗАМА И
ПРИМЕНА МОДЕРНИХ ЗАКОНА УПРАВЉАЊА**

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ Механика

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног родитеља и презиме кандидата: ПЕТАР (ДЕЈАН) МАНДИЋ
2. Назив и седиште Факултета на коме је стекао високо образовање: Машински факултет Београд
3. Година дипломирања: 2011.
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: 2011Обавештавамо Вас да је _____
Наставно-научно веће Факултета
(назив надлежног тела Факултета)на седници одржаној 09.11.2017
размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

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: 1980/4
Датум: 09.11.2017. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу захтева студента **Петра Мандића**, дипл. инж. маш., бр. 1980/1 од 18.09.2017. године да му се одобри израда докторске дисертације, реферата Комисије у саставу: др Михаило Лазаревић, ред. проф., др Александар Обрадовић, ред. проф. и др Томислав Шекара, ред. проф., ЕТФ Београд, број 1980/3 од 06.11.2017. године, а на основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 63. Статута Машинског факултета (број 1876/1 од 04.10.2013. године) и члана 30. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 09.11.2017. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **ПЕТАР МАНДИЋ**, дипл. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације **«НАПРЕДНО МОДЕЛОВАЊЕ СЛОЖЕНИХ РОБОТСКИХ СИСТЕМА И МЕХАНИЗАМА И ПРИМЕНА МОДЕРНИХ ЗАКОНА УПРАВЉАЊА»**.

За ментора студенту **Петру Мандићу**, именује се **др Михаило Лазаревић, ред. проф.**

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Радивоје Митровић

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Подобност теме и кандидата **Петра Д. Мандића** за израду докторске дисертације

Одлуком **Наставно-научног већа** бр. **1980/2** од **19.10.2017.** године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Петра Д. Мандића**, дипл.инж.маш, студента Докторских студија, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“**.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Петар Мандић рођен је 06.11.1984. у Котору, Република Црна Гора. Основну школу и гимназију (природно-математички смер) завршио је у Херцег Новом. Машински факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2003/2004. године. Дипломирао је 2011. године са просечном оценом 8.89 (осам и 89/100) и оценом 10 на дипломском испиту са темом "Неки примери примене симулационог софтверског пакета Cyberbotics Webots: пример управљања робота Neuroarm у решавању *Tower of Hanoi* проблема, пример инверзног клатна", из предмета Механика робота, а који је одбранио на Катедри за Аутоматско управљање. Дипломске студије завршио је по старом наставном плану и програму.

Докторске студије уписао је школске 2011/2012. године на Машинском факултету Универзитета у Београду. Тренутно је на трећој години студија, и има свих девет положених испита.

Од 19.12.2011. до 05.03.2014 био је запослен на Машинском факултету Универзитета у Београду као истраживач сарадник., на научном пројекту ТР 33047 Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије под називом "Интелигентни системи управљања климатизације у циљу постизања енергетски ефикасних режима у сложеним условима експлоатације". Од 06.03.2014. запослен је на Машинском факултету Универзитета у Београду као асистент на Катедри за Механику. Учесник је научно-билатералног пројекта између Републике Србије и НР Кине, бр. пројекта 3-12 (2016-2017).

Течно говори енглески језик, а поседује знање италијанског на средњем, и немачког језика на основном нивоу. Познаје програмске језике и пакете Matlab, C програмски језик, AutoCad, Solid Works, MS Office, TIA Portal.

Године 2011. објавио је своје прве научне радове. Члан је Српског друштва за механику, и међународне IUTAM организације.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Петар Мандић уписао је Докторске академске студије на Машинском факултету у Београду школске 2011/2012. године. Положио је све испите предвиђене Програмом усавршавања. Осим обавезних предмета (Виши курс математике, Нумеричке методе, Одабрана поглавља из механике, OMНИРiК), положио је следеће изборне предмете:

- Динамика система крутих тела (проф. др М. Лазаревић);
- Изабрана поглавља из механике робота (проф. др М. Лазаревић);
- Рачун нецелобројног реда са применама у инжењерству (проф проф. др М. Лазаревић);
- Управљање кретањем механичких система (проф. др А. Обрадовић).
- Виши курс дигиталних система аутоматског управљања (проф. др З. Бучевац);

Осим тога, положио је четири лабораторијска предмета (Истраживање и публиковање I, II, III и IV). Пројекат идеје докторске дисертације Петар Мандић је одбранио пред комисијом у саставу проф. др М. Лазаревић-потенцијални ментор, проф. др А. Обрадовић, проф. др Т. Шекара.

Од тренутка запослења на Машинском факултету кандидат учествује у настави на Основним и Мастер академским студијама, и то из следећих предмета: Механика робота, Механика 1, Механика 2, Механика 3, Механика М, Мехатронска роботика, Биомеханика ткива и органа, Биомеханика локомоторног система.

Као резултат истраживања, кандидат је објавио 32 рада у часописима и на скуповима међународног и националног значаја и једно поглавље у монографији од националног значаја.

Категорија M10

Радови у тематском зборнику водећег међународног значаја (M13)

- [1] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T.: *Stabilization of inverted pendulum by fractional order controller with experimental validation: D-decomposition approach*, -Advances in Robot Design and Intelligent Control – Proceedings of the 25th Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube region (RAAD2016), Editors: Aleksandar Rodić, Theodor Borangiu, Springer International Publishing, pp. 29-37, eBook ISBN 978-3-319-49058-8, DOI: 10.1007/978-3-319-49058-8_4.

Категорија M20

Радови објављени у научним часописима међународног значаја (M21)

- [2] **Mandić P.**, Šekara T., Lazarević M.: M. Bošković: *Dominant pole placement with fractional order PID controllers: D-decomposition approach*, -ISA Transactions, Vol. 67, pp. 76-86, 2017, ISSN 0019-0578.

Радови објављени у научним часописима међународног значаја (M22)

- [3] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T.: *D-decomposition technique for stabilization of Furuta pendulum: fractional approach*, -Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 64, No. 1, pp. 189-196, 2016, ISSN 2300-1917.

Радови објављени у научним часописима међународног значаја (M24)

- [4] **Mandić P.**, Lazarević M.: *An Application Example Of Webots In Solving Control Tasks Of Robotic System*, -FME Transactions (ISSN 1451-2092), Vol. 41, No.2, pp. 153-162, University of Belgrade-Faculty of Mechanical Engineering, 2013.
http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol41/2/10_pmandic.pdf

Категорија M30

Радови саопштени на скуповима међународног значаја штампани у целини (M33)

- [5] Lazarević M., **Mandić P.**, Vasić V.: *Some Applications Of Neuro Arm Interactive Robot And Webots Robot Simulation Tool*, -DEMI2011, Faculty of Mech.Eng. 26-28 May, Banjaluka, Republika Srpska, pp.923-928, ISBN 978-99938-39-36-1.
- [6] **Mandić P.**, Lazarević M.: *Jedan Primer Primene Webots-a U Rešavanju Zadataka Upravljanja Robotskog Sistema*, -ETRAN2012, Zlatibor 11-14 Jun, Srbija, RO3.5 pp.1-4, ISBN 978-86-80509-67-9.
- [7] Lazarević M., **Mandić P.**, Latinović T., Thomessen T.: *Some Results Of Control And Simulation Of Neuro Arm Robot*, -DEMI2013, Faculty of Mech.Eng. 30May-1th June, Banjaluka, Republika Srpska, pp.1077-1083, ISBN 978-99938-39-46-0, COBISS.BH –ID 3729176.
- [8] **Mandić P.**, Lazarević M., Stojanović S., Ristanović M.: *Real Time Control Of Rotary Inverted Pendulum*, -DEMI 2013, Banjaluka, DEMI2013, Faculty of Mech.Eng. 30May-1th June, Banjaluka, Republika Srpska, pp. 1059-1065, ISBN 978-99938-39-46-0, COBISS.BH –ID 3729176.
- [9] Lazarević M., Batalov S., Cajić M., **Mandić P.**: *Further results on integer and non-integer order PID control of robotic system*, -ICEST, Proceedings of Papers – Volume 2 of 2 volumes, 26-29. Jun 2013, Ohrid, Macedonia, pp.801-804, ISBN: 978-9989-786-89-1 COBISS.MK-ID 94746890.
- [10] **Mandić P.**, Lazarević M., Stojanović S., Ristanović M.: *Real Time Fractional Order Control Of Rotary Inverted Pendulum*, -Fourth Serbian Congress On Theoretical And Applied Mechanics, 4th-7th June 2013, Vrnjačka Banja, Serbia, pp.129-134, ISBN 978-86-909973-5-0, COBISS.SR-ID 198308876.
- [11] **Mandić P.**, Babić I., Tešanović S., Stojanović S., Ristanović M., Lazić D.: *Modeling, Simulation And Control Of Winter Regime Of An Air Conditioning System In A Classroom*, -44th International HVAC&R Congress, 4-12th December 2013, Belgrade, Serbia, pp.135-143, ISBN 978-86-81505-69-4, COBISS.SR-ID 202900748.
- [12] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T.: *Fractional Order PD Control Of Furuta Pendulum: D-decomposition Approach*, -International Conference on Fractional Differentiation and its Application, 23-25 June 2014, Catania, Italy, ISBN: 978-1-4799-2591-9.
- [13] Lazarević M., **Mandić P.**: *Feedback-feedforward iterative learning control for fractional order uncertain time delay system- PD alpha type*, -International Conference on Fractional Differentiation and its Application, 23-25 June 2014, Catania, Italy, ISBN: 978-1-4799-2591-9, DOI: [10.1109/ICFDA.2014.6967421](https://doi.org/10.1109/ICFDA.2014.6967421).

- [14] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T.: *An Algorithm for Stabilization of Linear Control Systems Using Fractional Order PID Controllers*, -4th Mathematical Conference of the Republic of Srpska, 6-7 June 2014, Trebinje, Republic of Srpska, ISBN 978-99976-600-2-2.
- [15] Babić I., Tešanović S., **Mandić P.**, Ristanović M., Lazić D.: *Discrete modeling and control of winter regime of an air conditioning system*, -12th Triennial International SAUM Conference, 12-14 November 2014, Niš, Serbia, ISBN 978-86-6125-117-7.
- [16] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T.: *D-decomposition Method For Stabilization Of Inverted Pendulum Using Fractional Order PD Controller*, -1st International Conference IcETRAN 2014, 2-5 June, 2014, Vrnjačka Banja, Serbia, ISBN 978-86-80509-70-9.
- [17] Bošković M., Šekara T., **Mandić P.**, Lazarević M., Govedarica V.: *Jedna nova metoda projektovanja PID regulatora primjenom spectra polova i D-razlaganja pod ograničenjima na performanse*, -XIV Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2015, 18-20 Mart 2015, Jahorina, Republika Srpska, pp.808-812, ISBN 978-99955-763-6-3.
- [18] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T.: *Control of the cart pendulum system by using a fractional order PD controller*, -12th International Conference on Accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology, 29-30 May 2015, Banjaluka, Republic of Srpska, pp. 557-562, ISBN 978-99938-39-53-8.
- [19] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T., Đurović N.: *Stabilization of cart pendulum system by using fractional order PD controller*, -5th International Congress of Serbian Society of Mechanics, 15-17 June 2015, Aranđelovac, Serbia, ISBN 978-86-7892-715-7.
- [20] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T., Jovanović R.: *Stabilization of the cart pendulum system by fractional order control with experimental realization*, -International Conference on Fractional Differentiation and its Application, 18-20 July 2016, Novi Sad, Serbia, pp.415-423, ISBN: 978-86-7892-830-7.
- [21] Bošković M., Šekara T., Rapaić M., Lazarević M., **Mandić P.**: *A novel ARX-based discretization method for linear non-rational systems*, -International Conference on Fractional Differentiation and its Application, 18-20 July 2016, Novi Sad, Serbia, pp.343-352, ISBN: 978-86-7892-830-7.
- [22] Cvetković B., Lazarević M., Djurović N., **Mandić P.**: *Open-closed loop fractional-order iterative learning control for singular fractional-order system*, -International Conference on Fractional Differentiation and its Application, 18-20 July 2016, Novi Sad, Serbia, pp.404-414, ISBN: 978-86-7892-830-7.
- [23] Bučanović Lj., Lazarević M., **Mandić P.**, Šekara T.: (Poster section) *Multivariable fractional order PID control of the cryogenic process of mixing of two gaseous air flows: D-decomposition method*, -International Conference on Fractional Differentiation and its Application, 18-20 July 2016, Novi Sad, Serbia, ISBN: 978-86-7892-830-7.
- [24] Lazarević M., **Mandić P.**, Cvetković B., Šekara T., Lutovac, B.: *Some electromechanical systems and analogies of mem-systems integer and fractional order*, 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, 12-16 June 2016, Bar, Montenegro, pp. 230-233, DOI: [10.1109/MECO.2016.7525748](https://doi.org/10.1109/MECO.2016.7525748).

- [25] Šekara T., Bošković M., **Mandić P.**, Lazarević M., Rapaić M.: *Nova metoda diskretizacije PI/PID regulatora*, -XV Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2015, 16-18 Mart 2016, Jahorina, Republika Srpska, pp.768-772, ISBN 978-99955-763-9-4.
- [26] **Mandić P.**, Lazarević M., Šekara T., Cajić M., Bučanović Lj.: *Stabilization of Double Inverted Pendulum System by Using a Fractional Differential Compensator*, The 29th Chinese Control and Decision Conference, 28-30 May 2017, Chongqing, China, pp. 1911-1916, DOI: [10.1109/CCDC.2017.7978829](https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978829).
- [27] Lazarević M., Cajić M., **Mandić P.**, Šekara T., Sun HG., Karličić D.: *Multi-mode active vibration control of a nanobeam using a non-square MIMO PID controller*, The 29th Chinese Control and Decision Conference, 28-30 May 2017, Chongqing, China, pp. 57-62, DOI: [10.1109/CCDC.2017.7978066](https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978066).
- [28] Lazarević M., Đurović N., Cvetković B., **Mandić P.**, Cajić M.: *PD^α-type iterative learning control for fractional-order singular time-delay system*, The 29th Chinese Control and Decision Conference, 28-30 May 2017, Chongqing, China, pp. 1905-1910, DOI: [10.1109/CCDC.2017.7978828](https://doi.org/10.1109/CCDC.2017.7978828).
- [29] Bošković M., Rapaić M., Šekara T., **Mandić P.**, Lazarević M.: *Pole placement based design of PIDC controller under constraint on robustness*, -XVI Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2017, 22-24 Mart 2017, Jahorina, Republika Srpska, pp.664-668, ISBN 978-99976-710-0-4.
- [30] Bošković M., Šekara T., Lutovac B., Daković M., **Mandić P.**, Lazarević M.: *Analysis of electrical circuits including fractional order elements*, 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, 11-15 June 2017, Bar, Montenegro, pp. 1-6, DOI: [10.1109/MECO.2017.7977226](https://doi.org/10.1109/MECO.2017.7977226).

Категорија M40

Националне монографија, тематски зборници, итд. (M45)

- [31] Lazarević M., Vidaković J., Cajić M., **Mandić P.**, *Prilog modeliranju i upravljanju robotskih i adaptivskih Sistema*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014, ISBN 978-86-7083-833-8.

Категорија M60

Предавање по позиву са скупа националног значаја штампано у изводу (M62)

- [32] **Mandić P.**: *Stabilizaciono upravljanje sistema inverznog klatna pomoću PD kontrolera frakcionog reda zasnovano na tehnici D-razlaganja*, -Minisimpozijum "Račun frakcionog reda sa primenama u problemima difuzije, upravljanja i dinamike složenih sistema", Matematički institutu SANU-a, Beograd, 13.jula 2016 godine, ISBN 978-86-7746-613-8.
- [33] **Mandić P.**: *Stabilizacija inverznog dvostrukog klatna primenom kontrolera necelog reda: metoda D-razlaganja*, Minisimpozijum "Nelinearna dinamika sa primenama u inženjerskim sistemima", Matematički institutu SANU-a, Beograd, 26.oktobar 2016 godine, ISBN 978-86-7746-623-7.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Током докторских студија Петар Мандић, дипл. инж. маш. студент Докторских студија, положио је све испите предвиђене планом докторских студија (45 ЕСПБ) који укључују и лабораторијски рад (53 ЕСПБ) и одбрана пројекта идеје докторске дисертације (22 ЕСПБ)

што у укупном износу даје 120 ЕСПБ бодова чиме је остварио услов да му се одобри израда докторске дисертације. Током својих досадашњих истраживачких активности, кандидат је показао посебну заинтересованост и афинитет за научно истраживачки рад. Научни радови публиковани у међународним и домаћим часописима, радови презентовани на међународним и националним научним скуповима и поглавље у монографији од националног значаја свакако указују на изразит смисао кандидата за бављење теоријским и експерименталним истраживањима и квалификују га за даљи успешан самосталан рад на предложеној докторској дисертацији.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања у оквиру докторске дисертације са предложеном темом је моделовање савремених роботских система и механизма, и управљање истих применом модерних управљачких алгоритама, као што су метода Д-разлагања и итеративно управљање путем учења. Посебна пажња у дисертацији биће посвећена примени фракционог рачуна у горе наведеним областима истраживања. Фракциони рачун или рачун нецелобројног реда је област математичке анализе која се бави изучавањем и применом извода и интеграла произвољног реалног или комплексног реда. То је генерализација класичног интегро-диференцијалног рачуна, где оператори интегралења и диференцирања имају целобројан степен. Последњих деценија примена рачуна нецелобројног реда привлачи пажњу све веће научне јавности у различитим гранама: математици, физици, техници, итд. У првом делу дисертације биће приказана примена фракционог рачуна у моделовању компонената роботског система, у циљу што бољег поклапања теоријских и експерименталних резултата. Осим тога значајан и изазован задатак представља и реализација робусног и прецизног управљања роботског система који свакако захтева и одговарајући динамички модел истог. Под динамичким параметрима роботског система подразумевамо физичке параметре попут масе и положаја центра маса сваког роботског сегмента, затим тензор инерције истих, као и одговарајуће коефицијенте сувог и вискозног трења које се незаобилазно јавља при кретању механичких система. Одређивање ових параметара роботског система може се извести на више начина: експерименталним путем, применом CAD модела (софтверских алата), и методама процене (естимације). Први начин подразумева монтажу робота на роботске сегменте, и одређивање динамичких параметара сваког сегмента понаособ. Други приступ подразумева примену софтверских пакета за 3Д моделирање, који поседују алате за прорачун наведених физичких параметара. Трећи начин се заснива на прикупљању улазно-излазних података при кретању роботског система дуж неке унапред дефинисане трајекторије, и процени динамичких параметара користећи одговарајуће развијене математичке алгоритме. Овај метод даје боље резултате у поређењу са прва два начина процене параметара. Он такође подразумева извођење експеримента, и процењује вредности непознатих параметара на основу одзива система. У овом делу дисертације биће изведен 3Д модел *NeuroArm*-а, робота са седам степени слободе, који је саставни део лабораторије за механику Машинског факултета у Београду. Из овог 3Д модела добиће се почетне процењене вредности динамичких параметара датог роботског система. Затим ће се методама процене ове вредности одредити са већом тачношћу, а валидација добијених резултата биће потврђена експерименталним путем.

Следећи део дисертације бавиће се проблемом напредног управљања. У литератури је предложен велики број различитих управљачких алгоритама за роботске системе. Најзаступљенији начин управљања роботским системом у индустрији подразумева употребу пропорционално-интегрално-диференцијалног (ПИД) регулатора. Напреднији алгоритми укључују нелинеарне структуре управљања, као што је управљање на основу инверзне динамике. Комбинација ове нелинеарне технике, заједно са пропорционално-интегрално-диференцијалним регулатором биће размотрена у овој дисертацији као један од могућих приступа управљања датим роботским системом. Уводи се ПИД регулатор фракционог реда, као генерализација класичног ПИД регулатора. Због већег броја подешљивих параметара,

овај регулатор обезбеђује робуснији и ефикаснији систем управљања. Међутим, већи број параметара повлачи проблем подешавања истих. Савремена теорија управљања приликом поступка подешавања параметара регулатора узима у обзир следеће утицаје: осетљивост система на немоделовану динамику, осетљивост система на дејство поремећаја, и осетљивост система на појаву шума. У литератури постоји мали број метода за подешавање фракционог регулатора. Овде ће се приказати један приступ решавању овог проблема који се заснива на методи Д-разлагања. Поступак методе Д-разлагања врло је једноставан за примену, не зависи од реда система, стога може бити од изузетног значаја за системе високог реда. Ова метода спада у графичке методе и служи за одређивање области стабилности у параметарској равни. Подешавање регулатора овом методом реализоваће се са циљем што ефикаснијег потискивања поремећаја, уз истовремено очување робусности и постизања доброг одзива система, у смислу прескока и времена смирења. Стабилност система биће анализирана у 2Д и 3Д простору подешљивих параметара система. Посебна пажња биће усмерена испитивању стабилности *underactuated* роботских механизма, који имају мање управљачких величина него степени слободе, што их чини изузетно захтевним за управљање. Такође, још један модеран приступ управљања роботским системом који ће бити размотрен у дисертацији, може се реализовати путем тзв. итеративног управљања учењем. При томе, примењени концепт итеративног учења целог и фракционог реда је заснован на особини поновљивости манипулационих задатака роботских система. Наиме, уочено је да је код извођења манипулационих задатака и при понављању једне исте трајекторије, могуће побољшати кинематичке и динамичке карактеристике датог система. Управљање путем учења је итеративни *offline* процес где постоји коначно време између два покушаја. На тај начин, учи се на основу претходног покушаја и искуства. Посебна пажња биће посвећена сложенијим структурама управљања путем учења, које представљају комбинацију управљања у директној и повратној спрези, при чему доминантну улогу представља управљање у директној спрези, и као такво има за циљ да оствари предикцију будућег управљања. Такође, посебан део проблема управљања биће посвећен проблематици одређивања трајекторије врха роботске хваталке између две задате тачке у радном простору. Наиме, да би врх роботске хваталке прешао из почетне тачке простора у крајњу, потребно је одредити путању дуж које ће се врх хваталке кретати. Овај проблем у општем случају није једнозначно одређен, и потребно је увести додатна ограничења да би се исти решио. На пример, један начин решавања овог проблема јесте захтевањем да путања буде унапред дефинисана крива са познатим профилем брзина или убрзања. Други начин спада у оптимизационе проблеме, нпр. да кретање између две тачке буде реализовано за минимално време, или при минималном утрошку енергије, и сл. Предности и недостаци оба начина биће размотрена у овом делу доктората. Такође, проблем одређивања трајекторије нераскидиво је везан за решавање инверзног кинематског задатка. Под тим се подразумева одређивање унутрашњих координата роботског система да би врх роботске хваталке пратио жељену путању описану са спољашњим координатама. Решење овог проблема у затвореној форми није могуће у општем случају, па се приступа нумеричким методама за решавање задатка, што ће такође бити обухваћено радом на овој дисертацији.

Референтна литература:

1. Čović, V., Lazarević, M.P.: *Mehanika robota*, Mašinski fakultet, Beograd, 2009.
2. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G.: *Robotics*, Springer-Verlag, London, 2009.
3. Khalil, W., Dombre, E.: *Modeling, Identification and Control of Robots*, Butterworth-Heinemann, 2004.
4. Gautier, M., Janot, A., Vandanjon, P.O.: *A new closed-loop output error method for parameter identification of robot dynamics*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013.
5. Swevers, J., Verdonck, W., De Shutter, J.: *Dynamic model identification for industrial robots*, IEEE Control Systems Magazine, 2007.

6. Lazarević, M., Spasic, A., Bucanovic, Lj., Krstic, D.: *Iterative learning feedback control algorithms of $PI^{\alpha}D^{\beta}$ type in process control systems*, 18th International Congress of Chemical and Process Engineering, Prague, 2008.
7. Lazarević, M., Obradović, A., Latinović, T.: *Bio-Inspired Control of Redundant Robotic Systems: Optimization approach*, Scientific Technical Review, 2012; 62: 44-54.
8. Park, K.J.: *Fourier-based optimal excitation trajectories for the dynamic identification of robots*, Robotica, 2006; 24(5): 625-633.
9. Swevers, J., Ganseman, C., Tukul, D.B., Schutter, J.D.: *Optimal robot excitation and identification*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997; 13(5): 730-739.
10. Šekara, T.B., Matausek, M.R.: *Optimization of PID Controller Based on Maximization of the Proportional Gain Under Constraints on Robustness and Sensitivity to Measurement Noise*, IEEE Trans Automat Contr, 2009; 54:184–9.
11. Šekara, T.B., Matausek, M.R.: *Relay-based critical point estimation of a process with the PID controller in the loop*, Automatica, 2011; 47(5): 1084-1088.
12. Hamamci, S.E.: *Stabilization using fractional-order PI and PID controllers*. Nonlinear Dynamics 2008; 51:329–43.
13. Samko, S.G., Kilbas, A.A, Marichev, O.I.: *Fractional Integrals and Derivatives: Theory and Applications*, Gordon and Breach, 1993.
14. Lazarević, M., Bučanović, Lj.: *Prilog modeliranju i dinamičkoj analizi sistema necelobrojnog reda sa osnovama racuna necelobrojnog reda*, Mašinski fakultet, Beograd, 2012.
15. Zheng, W., Luo, Y., Chen, Y.Q., Pi, Y.G.: *Fractional order modelling of permanent magnet synchronous motor speed servo system*, Journal of Vibration and Control, 2016; 22(9): 2255-2280.

3. Полазне хипотезе

На основу прегледа литературе и сопственог искуства дефинишу се следеће полазне хипотезе у оквиру ове дисертације:

Хипотеза 1:

Користиће се методе аналитичке механике за добијање физичког модела система крутих тела са два и више степени слободе кретања. Прецизније, за формирање кинематског и динамичког модела роботског система искористиће се Родригов приступ (Родригове матрице трансформација), који је посебно погодан за описивање овог типа механичких система. Увођењем одређених претпоставки у поступку моделовања разматраног роботског система могу се у моделима компоненти роботског система применити одговарајући оператори извода и интеграла нецелобројног реда чије су дефиниције познате у теорији нецелобројног рачуна.

Хипотеза 2:

За одређивање вредности динамичких параметара роботског система могуће је применити методе процене које се углавном заснивају на методи најмањих квадрата, и чињеници да је математички модел робота линеаран у односу на непознате параметре чије вредности треба одредити.

Хипотеза 3:

Математичка теорија стабилности, примењена кроз методу Д-разлагања, искористиће се за пројектовање управљачког система. Такође, предности модерне теорије фракционог рачуна и овде ће доћи до изражаја увођењем ПИД регулатора нецелобројног реда, чиме ће се добити робуснији роботски систем са бољим перформансама.

Хипотеза 4:

Теорија оптимизације, потпомогнута модерним софтверским алатима за решавање датих проблема, биће примењена за одређивање трајекторије врха роботске хваталке између две задате тачке у радном простору.

4. Научне методе истраживања

Током реализације циљева истраживања користиће се следеће научне методе (теорије):

- Методе аналитичке механике;
- Теорија рачуна нецелобројног реда;
- Методе процене (естимације) параметара;
- Теорија стабилности система- параметарска метода Д-разлагања;
- Савремене методе оптимизације;

5. Очекивани научни допринос

Успешном реализацијом циљева истраживања и применом поменутих научних метода и поступака, могу се очекивати следећи научни доприноси:

- Моделовање роботских система и механизма и њихових компонената, са циљем добијања прецизнијег и реалнијег математичком модела.
- Развијање брзих и ефикасних алгоритама за процену непознатих параметара датог роботског система.
- Развијање нових алгоритама применом методе Д-разлагања и савремене теорије фракционог рачуна за подешавање параметара управљачког система са циљем што ефикаснијег потискивања поремећаја, постизања бољих перформанси, уз истовремено очување робусности система.
- Развијање нових алгоритама робусног управљања за дати роботски систем применом итеративног управљања путем учења и савремене теорије фракционог рачуна.
- Решавање адекватним нумеричким методама сложеног оптимизационог проблема кретања врха роботске хватаљке, описаног нелинеарним диференцијалним једначинама са задатим ограничењима.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања у оквиру предложене теме докторске дисертације одвијаће се кроз следеће фазе:

- Формирање кинематског и динамичког модела роботских система и механизма са више степени слободе кретања применом Родриговог приступа.
- Моделовање компоненти роботског система применом фракционог рачуна у циљу добијања што веродостојнијег математичког модела.
- Формирање 3Д модела *NeuroArm*-а, робота са седам степени слободе кретања, применом софтверских пакета, и одређивање почетних процењених вредности динамичких параметара система.
- Одређивање динамичких параметара роботског система погодно одабраним методама процене (естимације) и валидација естимираних параметара система експерименталним путем.
- Анализа понашања система коришћењем различитих софтверских пакета за симулацију, попут *Webots*-а, *Matlab Simulink*а, и сл.
- Пројектовање управљачког система увођењем пропорционално-интегрално-диференцијалног регулатора нецелобројног реда.
- Подешавање параметара регулатора методом Д-разлагања у 2Д и 3Д простору.
- Примена пројектованог управљачког система на ширу класу механичких објеката управљања у циљу показивања његове ефикасности, са посебним освртом на класу *underactuated* роботских механизма (имају вишак степени слободе у односу на број управљачких величина).

- Управљање роботским системом путем итеративног учења целог и фракционог реда, засновано на особини поновљивости манипулационих задатака роботских система.
- Примена оптималног приступа у циљу решавања проблема кретања врха роботске хваталке између две задате тачке у радном простору.Решавање инверзног кинематског задатка нумеричким путем.

7. Закључак и предлог

На основу изложене анализе пријаве теме кандидата Петра Мандића, дипл.инж.маш, студента Докторских студија, Комисија за оцену подобности и научне заснованости теме закључује да је кандидат успешно положио све испите предвиђене планом усавршавања и објавио значајан број научних радова чиме је стекао услов за одобравање теме за израду докторске дисертације.Такође, комисија закључује да је предложена тема изузетно актуелна и пододна за израду докторске дисертације, као и да кандидат испуњава све Законом и Статутом Машинског факултета предвиђене услове и има истраживачке способности за рад на докторској дисертацији. Имајући у виду све наведено, Комисија предлаже Већу докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду да се кандидату

Петру Мандићу, дипл. инж. маш.

студенту Докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду, одобри израда докторске дисертације под називом:

„Напредно моделовање сложених роботских система и механизма и примена модерних закона управљања“

која припада области техничких наука, **машинство**, ужој научној области **Механика**, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

За **ментора** током израде предметне дисертације предлаже се проф. др **Михаило П. Лазаревић**, редовни професор на Катедри за Механику Машинског факултета Универзитета у Београду.

Београд, 2.11.2017.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Проф. др Михаило Лазаревић, редовни професор
Универзитет у Београду,Машински факултет

.....
Проф. др Александар Обрадовић, редовни професор
Универзитет у Београду,Машински факултет

.....
Проф. др Томислав Шекара, редовни професор
Универзитет уБеограду,Машински факултет

Додатак уз образац 1.

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ

Име и презиме: др Михаило П. Лазаревић

Звање: редовни професор

Списак радова објављених у научним часописима са Science Citation Index (SCI) листе који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Mandić P., Šekara T., **Lazarević M.**: M. Bošković: *Dominant pole placement with fractional order PID controllers: D-decomposition approach*, -ISA Transactions, Vol. 67, pp. 76-86, 2017, ISSN 0019-0578, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.11.013>
2. Mandić P., **Lazarević M.**, Šekara T.: *D-decomposition technique for stabilization of Furuta pendulum: fractional approach*, -Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 64, No. 1, pp. 189-196, 2016, ISSN 2300-1917. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2016-0021>
3. 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, Vol. 40, Issue 5, April 2013, Elsevier, (ISSN 0957-4174), <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.09.010>.
4. 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, No. 12, 2012, pp. 2001-2020, (ISSN: 0005-1179). doi:10.1134/S0005117912120065, <https://link.springer.com/article/10.1134/S0005117912120065>
5. **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, <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2005.08.010>
6. M. Cajić, **M. P. Lazarević**, *Fractional order spring/spring-pot/actuator element in a multibody system: Application of an expansion formula*, Mechanics Research Communications 62 (2014) 44–56, <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.08.009>

(навести најмање један рад у случају менторства дисертације која се пријављује до 31.12.2008. године, односно најмање три рада у случају менторства дисертације која се пријављује у периоду од 1.01.2009. до 31.12.2009. године, односно најмање пет радова у случају менторства дисертације која се пријављује почев од 1.01.2010. године)

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА
