

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Косте М. Јовановића за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 770 од 21.1.2014. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Косте М. Јовановића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Моделирање и управљање антропомиметичког робота са антагонистичким погонима у контактним и бескотактним задацима“** (енг. **“Modeling and control of the anthropomimetic robot with antagonistic joints in contact and non-contact tasks”**).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Коста Јовановић је рођен 1986. године у Чачку. Основну школу и Гимназију је завршио у родном граду као ученик генерације. Дипломирао је на Одсеку за сигнале и системе Електротехничког факултета у Београду 2009. године са просечном оценом 9,96 као најбољи студент на одсеку. Мастер студије је завршио 2010. године такође на Одсеку за сигнале и системе са просечном оценом 10,00. Докторске студије на Електротехничком факултету је уписао 2010. године на модулу Управљање системима и обрада сигнала, где је до данас положио осам испита са просечном оценом 10,00.

Коста Јовановић је у марту 2010. године изабран у звање сарадника у настави на Одсеку за сигнале и системе на Електротехничком факултету у Београду, а у априлу 2011. За асистента где је и данас ангажован на курсевима: Механика (ОС2М), Практикум из софтверских алата (ОС2ПСА/ОФ2ПСА), Хидраулички и пнеуматски системи (ОС3ХПС), Роботика и аутоматизација (ОС3РА), ЦНЦ системи и флексибилна аутоматизација (ОС4ЦНЦ), Сензори у роботици (ОС4СУР), Теорија роботских система (ОС4ТРС) и Роботски системи (МС1РС). Поред тога Коста Јовановић учествује и у одржавању лабораторијских вежби на курсевима: Сигнали и системи (ОС2СИС/ОТ2СИС/ИР2СИС/ОФ2СИС) и Системи аутоматског управљања (ОС3СА1/ОЕ3САУ/ОТ3САУ). Претходно, од јуна до септембра 2009. године, Коста Јовановић је радно искуство стицао у одељењу за електронику и аутоматику у компанији СМС Сиемаг у Немачкој као стипендиста Фондације др Зоран Ђинђић и Одбора немачке привреде за сарадњу са истоком. Током јула и августа 2010. године, Коста Јовановић

је боравио на истраживачком стажу у Лабораторији за роботiku и ембедед системе на Техничком универзитету у Минхену (ТУМ Минхен), у јулу 2012. године је похађао летњу школу роботике на Политехничком универзитету у Цириху (ЕТХ Цирих), а током лета 2013. године Коста Јовановић је боравио у Институту за роботiku и мехатронику при Центру за свемирска истраживања (ДЛР) у Минхену.

Нека од признања Косте Јовановића за досадашњи рад и активности су:

- Награда научног портала СУПЕРСТЕ за најбољег младог научника у области природних и техничких наука (2013. год.),
- Награда града Београда за организацију догађаја године у Београду за манифестацију „Дани будућности: роботика“, (организациони тим: Александра Дреџун, Центар за промоцију науке, проф. Вељко Поткоњак, 2013. год.),
- Награду Фондације Никола Тесла за изузетна достигнућа младих научника у области техничких наука (2012. год.),
- Прва награда на међународном такмичењу студентских пројеката у области инжењерства – ICAMES у Истанбулу (2011. год.),
- Награда Универзитета у Београду за најбољи студентски научно-истраживачки рад у области техничких наука (2011. год.),
- Награда за најбољег дипломца на Одсеку за сигнале и системе (2009. год.),
- Награда проф. Мирка Милића (2009. год.).

Од 2012. године члан је ИЕЕЕ секције, Друштва за роботiku и аутоматику.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Област истраживања Косте Јовановића је роботика и управљање системима.

У оквиру ове области Коста Јовановић је до сада учествовао на следећим пројектима:

- ФП7 пројекат Европске Уније: *ECCEROBOT – Embodied Cognition in a Compliantly Engineered Robot*, (2009. - 2013. године)
- пројекат Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика. (2011. - 2014. године)

На докторским студијама је положио 8 испита са просечном оценом 10,00:

- Интелигентни роботски системи
- Неуралне мреже
- Увод у научни рад
- Теорија роботских система
- Наменске сензорске мреже
- Моторна контрола и рехабилитација
- Вештачка интелигенција
- Специјални роботски системи

Досадашњи резултати кандидата Косте Јовановића су приказани кроз публиковане и радове прихваћене за публикавање и то: 1 рад у поглављу монографије међународног значаја, 6 радова у научним часописима међународног значаја (од тога 5 са импакт фактором), 2 рада у

часописима од националног значаја, 11 радова штампаних у зборницима међународних научних скупова и 7 радова штампаних у зборницима научних скупова од националног значаја.

Радови у поглављу монографије међународног значаја:

1. (M14) V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic. *Springer Series on Mechanisms and Machine Science – New trends in Medical and Service Robotics, Vol 20*, (2014). Chapter 20: “How to Control Anthropomorphic Robot: Engineering and Cognitive Approach” (ISBN 978-3-319-05431-5, DOI: 10.1007/978-3-319-05431-5)

Радови у научним часописима међународног значаја:

1. (M23) **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, O. Holland, “Dynamic Modelling of an Anthropomorphic Robot in Contact Tasks”, *Advanced Robotics (Taylor & Francis)*, accepted.
2. (M23) V. Antoska, **K. Jovanovic**, V. Petrovic, N. Bascarevic, M. Stankoviski, “Balance Analysis of the Mobile Anthropomorphic Robot Under Disturbances – ZMP Approach”, *International Journal of Advanced Robotic Systems (InTech)*, Vol 10(paper 206), 2013, pp 1-10
3. (M21) S. Wittmeier, C. Alessandro, N. Bascarevic, K. Dalamagkidis, A. Diamond, M. Jantsch, **K. Jovanovic**, R. Knight, H. G. Marques, P. Milosavljevic, B. Svetozarevic, V. Potkonjak, R. Pfeifer, A. Knoll, O. Holland, “Towards Anthropomorphic Robotics”, *Artificial Life, (MIT press)*, Vol 19(1), 2013, pp 171-193
4. (M24) V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, O. Holland, J. Uthomibhi, “Distance learning and skill acquisition in engineering sciences – present state and prospects”, *Multicultural Education and Technology Journal (Emerald)*, Vol 7(1), 2013, pp 64-88
5. (M23) V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, “The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic system”, *International Journal of Advanced Robotic Systems (InTech)*, Vol 8, 2012, pp 143-155
6. (M21) V. Potkonjak, M. Vukobratovic, **K. Jovanovic**, M. Medenica, “Virtual Mechatronic/Robotic laboratory - A step further in distance learning”, *Computers & Education (Elsevier)*, Vol 55, 2010, pp 465-475

Радови у часописима од националног значаја:

1. (M53) B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, “Control of Compliant Anthropomorphic Robot Joint”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol 8 (2011) pp 85-93
2. (M53) V. Petrovic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak. “Influence of External Disturbances to Dynamic Balance of the Semi-Anthropomorphic Robot”, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol 11 (2014) pp 145-158

Радови у зборницима међународних научних скупова:

1. (M33) V. Potkonjak, V. Petrovic, **K. Jovanovic**, D. Kostic, “Human-Robot Analogy – How Physiology Shapes Human and Robot Motion”, Proc. European Conference on Artificial Life (ECAL 2013, MIT Press), Taormina, Italy, September 2013, pp. 136-143.
2. (M33) V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, V. Petrovic, O. Holland, J. Uthomibhi, “Virtual Ambient for E-Learning in Engineering Sciences”, Proc. Conference of the International Journal of Arts and Sciences, Valletta, Malta, March 2013, Vol. 6(1), pp. 7-14.
3. (M33) V. Potkonjak, N. Bascarevic, P. Milosavljevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, „Experience-Based Fuzzy Control of an Anthropomorphic Robot“, Proc. International Joint Conference on Computational Intelligence (CFF IJCCI 2012), Barcelona, Spain, October 2012., pp 389-394
4. (M33) N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, V. Potkonjak, O. Holland, „Tip-over Stability Examination of a Compliant Anthropomorphic Mobile Robot“, Proc. 2012 IEEE International Conference on Control Applications (IEEE CCA 2012), Dubrovnik, Croatia, October 2012., pp 1584-1589
5. (M33) P. Milosavljevic, N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, G. Kvascev, “Neural networks in feedforward control of a robot arm driven by antagonistically coupled drives”, *The 11th Symposium on Neural Networks Applications in Electrical Engineering (NEUREL 2012)*, Belgrade, Serbia, September, 2012., pp 77-80
6. (M33) P. Milosavljevic, **K. Jovanovic**, N. Bascarevic, V. Potkonjak, O. Holland, „Heuristic Machine-Learning Approach to the Control of an Anthropomorphic Robot Arm“, Proc. 10th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO 2012), Dubrovnik, Croatia, September 2012., pp 301-306

7. (M33) V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, P. Milosavljevic, N. Bascarevic, O. Holland, "The Puller-Follower Control Concept For The Multi-Joint Robot With Antagonistically Coupled Compliant Drives", *The 2nd IASTED International Conference on Robotics (Robo 2011)*, Pittsburgh, USA, November 2011. pp 375-381
8. (M33) V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, B. Svetozarevic, O. Holland, D. Mikicic, "Modeling and Control of a Compliantly Engineered Anthropomorphic Robot in Contact Tasks", *The 35th ASME Mechanisms and Robotics Conference*, Washington, DC, USA, August 2011. pp 23-32
9. (M33) V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, "Anthropomorphic Robot with Passive Compliance – Contact Dynamics and Control", *The 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Corfu, Greece, Jun 2011. pp 1059 – 1064
10. (M33) V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, "Biologically-inspired control of a compliant anthropomorphic robot", *The 15th IASTED International Conference on Robotics and Applications*, Cambridge, Massachusetts, USA, November 2010. pp 182-189
11. (M33) V. Potkonjak, B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, O. Holland, "Control of Compliant Anthropomorphic Robot Joint", *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics*, Rhodes, September 2010. pp 1271-1274

Радови у зборницима научних скупова од националног значаја:

1. (M63) V. Petrovic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, "ZMP approach to the critical design of a mobile platform for the semi-anthropomorphic robot", *The 57th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, June, 2013. pp RO1.1- 1-6
2. (M63) V. Potkonjak, **K. Jovanovic**, "Step toward distance learning in engineering disciplines – Virtual laboratory for robotics and mechatronics", *The 56th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, June, 2012. pp RO1.1- 1-4
3. (M63) N. Bascarevic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, "A tip-over stability analysis of an anthropomorphic wheeled robot based on zmp", *The 56th ETRAN Conference*, Zlatibor, Serbia, June, 2012. pp RO2.9 - 1-4
4. (M63) **K. Jovanovic**, N. Bascarevic, "Modeling Contact Dynamics of the Anthropomorphic Robot – ECCEROBOT", *The 55th ETRAN Conference*, Teslic, Bosnia and Herzegovina, June, 2011. pp RO1.8- 1-4
5. (M63) P. Milosavljevic, **K. Jovanovic**, V. Potkonjak, "The Puller-Follower Control Concept in the Multi-Jointed Anthropomorphic Robot Body", *The 55th ETRAN Conference*, Teslic, Bosnia and Herzegovina, June, 2011. pp RO1.7- 1-4
6. (M63) **K. Jovanovic**, B. Svetozarevic, "Humanoid Robot Model with Antagonistic Drives", *The 54th ETRAN Conference*, DonjiMilanovac, Serbia, June, 2010. pp RO1.3 - 1-4
7. (M63) B. Svetozarevic, **K. Jovanovic**, "Control of Compliant Anthropomorphic Robot Joint", *The 54th ETRAN Conference*, DonjiMilanovac, Serbia, June, 2010. pp RO1.4 - 1-4

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу претходног приказа резултата досадашњег рада као и на основу личног искуства у раду са кандидатом Костом Јовановић, Комисија је сагласна да је кандидат показао способности за рад на предложеној теми докторске дисертације. Постигнутим резултатима Коста Јовановић је демонстрирао да је вредан и одговоран кандидат који је показао способност да своја теоријска и практична знања успешно примени у пракси, а у складу са тим и демонстрира научној јавности. Кроз ангажман на бројним курсевима у области истраживања којој припада и ова предложена тема докторске дисертације Коста Јовановић је до сада успешно своја знања преносио на млађе колеге и показао склоност ка педагошком раду.

Кроз успешан ангажман на пројектима Коста Јовановић је стекао контакте са водећим домаћим и страним истраживачких институција у области роботике и управљања системима. Тим везама је допринела и самоиницијатива кандидата за учешће на праксама и летњим школама водећих европских институција.

Предложена тема докторске дисертације кандидата Косте Јовановића је у складу са резултатима приказаним кроз публиковане радове, где је евидентно да ти радови чине срж

предложеног истраживања које се очекује да буде допуњено кроз будући рад кандидата и израду ове докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Правац развоја сервисних робота најновије генерације наглашава важност безбедне интеракције робота са околином, енергетске ефикасности робота, као и могућности робота да оптимално делује у окружењу које је потпуно прилагођено човеку [1,2]. Овако дефинисани приоритети довели су до развоја робота на такозваном „антропомиметичком“ принципу [3,4]. Овај принцип истиче важност конструкције робота који подсећају не само изгледом на човека већ и погонским структурама и обрасцима функционисања, јер је то најбољи начин да се постигне безбедан и ефикасан рад робота у свакодневном човековом окружењу.

Тренутно неке од водећих светских лабораторија и истраживачких центара се упрво баве овом проблематиком – како конструисати, реализовати и управљати антропомиметичку машину која ће имати велики употребни потенцијал у сервисној и кућној роботизици, као једне од области од које научници очекују да највише промени људску свакодневницу и покрене нову индустријску револуцију. Неки од актуелних пројеката су роботи Кензо (*Kenzoh*) [5] и Кенширо (*Kenshiro*) [6] лабораторије JCK Универзитета у Токију, ЕКЕРОБОТ (*ECCEROBOT*) француске компаније „The Robot Studio“, Твенди-један (*TWENDY-ONE*) Универзитета Васеда [7]). Централно место у развоју ове врсте робота заузима развој нове генерације погонских система који својом механичком конструкцијом омогућавају пасивну попустљивост [8] у комбинацији са управљачким законима захваљујући којима се постиже активна попустљивост [9].

Највећи број алата, модела и софтвера за симулацију рада ових сложених механичких структура се ослања на употребу тзв. система за симулацију физике проблема (*physics-based engines*) [10-12]. Ови системи се користе за реализацију видео игара где симулација не захтева напредну динамику. Ради бржег извршавања програма, они уносе низ недостатака [13] и апроксимација (пригушење у зглобовима, дефиниција трења, итд.) недопустивих са становишта озбиљног истраживачког рада и развоја. За детаљну анализу и симулацију кретања описаних роботских механизма и њихове интеракције са околином потребан је свеобухватан приступ базиран на комплексном математичком апарату заснованом на комплетном моделу динамике. Од посебног значаја је и развој комплетног модела динамике робота који користи антагонистички спрегнуте погоне са механичком попустљивошћу уведеном кроз еластичне елементе попут опруга, као што је то углавном случај код човека, јер би се на тај начин обрасци функционисања човека могли искористити за погон роботске конструкције. Како је нагласак на безбедној интеракцији робота са окружењем, од великог значаја је и развој математичког модела динамике који ће омогућити анализу различитих контактних задатака [14].

Развој нових материјала, као и савремених метода и технологија омогућили су развој великог броја антропомиметичких роботских механизма, али као инжењерски најизазовнији задатак се намеће управљање оваквим механизмима. Неки од ефеката који овај проблем чине изразито интересантним су погонска редунданса (више актуатора него степени слободе робота), еластичност уведена кроз погонске и трансмисионе елементе, измештање погона и увођење жичног преноса ради смањења оптерећења конструкције, инерцијални ефекти услед међусобног утицаја сегмената у кинематском ланцу, итд. [15-19]. Иако већ постоје неке реализације погонских система по угледу на антагонистички упарене мишиће човека [20, 21], управљачки проблем је и даље врло актуелно питање. Коришћење конвенционалних управљачких алгоритама за решење овог проблема је предложено у [22-25] кроз робусне и мултиваријабилне управљачке методе. Ипак, кроз приказане резултате исказана је потреба да се недостаци конвенционалних управљачких алгоритама надоместе кроз искуство и методе управљања које се ослањају на учење [26-28]. Коначно питање управљања антагонистичког

погона у контактним задацима је отворена тема, иако се решења могу наслутити кроз развој техника попут импедансног управљања (*impedance control*) [29] или хибридног управљања по позицији и сили (*hybrid position/force control*) [30].

Циљ овог истраживања је вишеструк и огледа се кроз две главне целине. Прва целина је да се реализује егзактан математички апарат на бази комплетног модела динамике робота са антагонистички спрегнутим погонима и то у контактним задацима који ће обухватати и крут али и еластични контакт робота са својим окружењем. Потребно је размотрити могућност развоја софтвера универзалне платформе која ће уз минималне интервенције моћи да се користи као алат за истраживање у области антропомиметичких робота. Употребна вредност овог софтвера би се огледала и у могућности за развој и тестирање управљачких алгоритама за робота са антагонистички спрегнутим погонима и пасивном попустљивошћу као друге значајне целине истраживања. Предложено истраживање ће проширити могућност контроле антагонистички спрегнутих погона робота коришћењем како конвенционалних метода тако и метода управљања на бази учења. Од интереса су управљање кретањем антропомиметичких робота, али и управљање силом у контактним задацима. Коначно, задатак истраживања је да представи компаративну анализу коришћених метода управљања кроз коју ће бити предложен финални управљачки систем.

Листа референци

- [1] H. Ritter, G. Sagerer, R. Dillmann, M. Buss. Human Centered Robotics System. Springer Series: Cognitive System Monographs; 2010.
- [2] T. Asfour, P. Azad, N. Vahrenkamp, K. Regenstien, A. Bierbaum, K. Welke, J. Schroder, R. Dillmann. Toward humanoid manipulation in human-centred environments. *Robotics and Autonomous Systems*. 2007; 56: 54-65.
- [3] O. Holland, R. Knight. The Anthropomimetic Principle. In Burn, J. and Wilson, M. (eds.), Proceedings of the AISB06 Symposium on Biologically Inspired Robotics, 2006
- [4] A. Diamond, R. Knight, D. Devereux, O. Holland. Anthropomimetic Robots: Concept, Construction and Modelling. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2012; 9:1-14.
- [5] Y. Nakanishi, T. Izawa, T. Kurotobi, J. Urata, K. Okada, M. Inaba. Achievement of Complex Contact Motion with Environments by Musculoskeletal Humanoid using Humanlike Shock Absorption Strategy. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2011; 1815-1820; San Francisco, USA.
- [6] Y. Asano, H. Miyoguchi, T. Kozuki, Y. Motegi, M. Osada, J. Urata, Y. Nakanishi, K. Okada, M. Inaba. Lower Thigh Design of Detailed Musculoskeletal Humanoid – Kenshiro. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012; 4367-4372; Algarve, Portugal.
- [7] T. Sugaiwa, G. Fujii, H. Iwata, S. Sugano. A Methodology for Setting Grasping Force for Picking up an Object with Unknown Weight, Friction, and Stiffness. *Proc. of IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. 2010; 288-293; Nashville, USA.
- [8] R. Van Ham, T. Sugar, B. Vanderborght, K. Hollander, D. Lefeber. Compliant Actuator Design. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 2009; 16(3): 81-94.
- [9] R. Schiavi, A. Bicchi, F. Flacco. Integration of active and passive compliance control for safe human-robot coexistence. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Robotics and Automation*. 2009; 259-264; Kobe, Japan.
- [10] A. M. M. Omer, Yu Ogura, H. Kondo, H. Lim, A. Takanishi. Dynamic-based Simulation for Humanoid Robot Walking using Walking Support System. *Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration*. 2008; 23-38; Nagoja, Japan.
- [11] V. Tikhonoff, P. Fitzpatrick, F. Nori, L. Natale, G. Metta, A. Cangelosi. The iCub Humanoid Robot Simulator. *IEEE IROS Workshop on Robot Simulators*, 2008; Nice, France.
- [12] S. Wittmeier, M. Jeantsch, K. Dalamagkidis, A. Knoll. Physics-based Modeling of an Anthropomimetic Robot. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2011; 4148-4153; San Francisco, USA.
- [13] E. Drumwright, J. Hsu, N. Koenig, D. Shell. Extending Open Dynamics Engine for Robotics Simulation. *Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (Lecture Notes in Computer Science)*; 6472:38-50. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2010.
- [14] M. Vukobratovic, V. Potkonjak, V. Matijevic. Dynamics of Robots with Contact Tasks (ch.2). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2003.

- [15] L.S. Chang, J.J. Lee, C.H. Yen. Kinematic and compliance analysis for tendon-driven robotic mechanisms with flexible tendons. *Mech Mach Theory*. 2005; 40:728–739.
- [16] M. Van Damme, P. Beyl, B. Vanderborgh, R. Van Ham, I. Vanderniepen, A. Matthys, P. Cherelle, D. Lefeber, The Role of Compliance in Robot Safety Seventh IARP Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments (DRHE 2010), pp.65 – 71
- [17] G. Pratt, M. Williamson. Series elastic actuators. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 1995; 399–406; Pittsburgh, USA.
- [18] W.L. Tsai. Design of tendon-driven manipulators. *J Mech Design*. 1994; 117(B):80-86.
- [19] J.J. Lee, H.J. Lee. Dynamic analysis of tendon driven robotic mechanisms. *Journal of Robotic Systems*. 2003; 20(5):229–238.
- [20] S. Northrup, N. Sarkar, K. Kawamura. Biologically-Inspired Control Architecture for a Humanoid Robot. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2001; 1100-1105; Maui, HI, USA.
- [21] J. Yamaguchi, A. Takanishi. Development of a biped walking robot having antagonistic driven joints using nonlinear spring mechanism. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Robotics and Automation*. 1997; 185-192; Albuquerque, NM, USA.
- [22] T. Wimbock, C. Ott, G. Hirzinger. Immersion and invariance control for an antagonistic joint with nonlinear mechanical stiffness. *Proc. of IEEE Conference on Decision and Control*. 2010; 1128-1135; Atlanta, GA, USA.
- [23] A. Palli, C. Melchiorri, T. Wimbock, M. Grebenstein, G. Hirzinger. Feedback linearization and simultaneous stiffness-position control of robots with antagonistic actuated joints. *Proc. of IEEE-RSJ International Conference on Robotics and Automation*. 2007; 4367 - 4372; Roma, Italy.
- [24] V. Potkonjak, B. Svetozarevic, K. Jovanovic, O. Holland. Biologically Inspired Control of a Compliant Anthropomorphic Robot. *Proc. 15th IASTED Intl. Conf. on Robotics and Applications*. 2010; 182–189; Cambridge, Massachusetts, USA.
- [25] V. Potkonjak, B. Svetozarevic, K. Jovanovic, O. Holland. The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic system. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2011; 8(5):143-155.
- [26] V. Potkonjak, N. Bascarevic, P. Milosavljevic, K. Jovanovic, O. Holland, „Experience-Based Fuzzy Control of an Anthropomorphic Robot“, *Proc. International Joint Conference on Computational Intelligence (CFP IJCCI 2012)*, Barcelona, Spain, October 2012., pp 389-394
- [27] P. Milosavljevic, N. Bascarevic, K. Jovanovic, G. Kvascev. Neural networks in feedforward control of a robot arm driven by antagonistically coupled drives. *The 11th Symposium on Neural Networks Applications in Electrical Engineering (NEUREL 2012)*. 2012; 77-80, Belgrade, Serbia.
- [28] P. Milosavljevic, K. Jovanovic, N. Bascarevic, V. Potkonjak, O. Holland. Heuristic Machine-Learning Approach to the Control of an Anthropomorphic Robot Arm. *Proc. 10th IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO 2012)*. 2012; 301-306. Dubrovnik, Croatia.
- [29] N. Hogan. Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-Theory. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 1984; 107(1): 1-7.
- [30] K. Ohishi, M. Miyazaki, M. Fujita. Hybrid control of force and position without force sensor. *Proc. International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation*. 1992; 670-675; San Diego, CA, USA.

3. Полазне хипотезе и научне методе истраживања

Развој индустријске, а још више сервисне роботике је у многама ограничено конвенционалним крутим погонима роботског зглоба који се састоје од мотора праћеног редуктором. Из тог разлога велика пажња се придаје истраживањима у смеру нових роботских зглобова који укључују попустљивост (енг. *compliant joints*). Овакви роботски системи су погодни за употребу у људском окружењу због безбедније интеракције са околином, али је због њихове механичке сложености, управљање оваквим машинама истраживачки и научно још увек изазован и недовољно решен проблем. Један од основних задатака јесте да се обезбеди алат у виду егзактног математичког модела који ће омогућити

веродостојно испитивање динамике робота у контактним задацима, а самим тим и бити примарна одредница у развоју и тестирању управљачких техника.

Коришћењем Њутн-Ојлерових једначина могуће је егзактно описати динамику механичког система (како робота тако и његовог окружења) укључујући ефекте који се јављају у системима представљеним сложеним разгранатим кинематичким ланцима – инерцијалне силе, центрифугалне/центрипеталне силе, Кориолисов ефекат, гравитационе силе, итд. За потребе моделирања антропомиметичког робота од интереса је и моделирање зглобова робота кроз попустљиве структуре са антагонистички спрегнутим погонима налик антагонистички упареним мишићима који преовладавају код сисара. Контакт са околином као интеракција између два динамичка система може се анализирати кроз законе судара и контактне динамике, уз представљање контактних површина као крутих или вискозно-еластичних структура.

Техничка решења за реализацију погона роботских зглобова се карактеришу много мањим односом масе и корисне снаге (енг. *weight-to-power ratio*) спрема мишића човека. Зато се улажу велики напори и ресурси да се реализује погон који ће по овим перформансама бити близак људском мишићу. Тиме би се омогућило да се образци функционисања антагонистички упарених мишића (анализом неуро мишићних активности – ЕМГ сигнала), искористе за управљање техничким реализацијама као природан алгоритам за енергетски ефикасно функционисање.

Да би се постигла одговарајућа контрола оваквих нелинераних система са више степени слободе, механичком попустљивошћу и антагонистички спрегнутим погонима који уносе редунасу у систем управљања, потребно је применити технике нелинеарног и мултиваријабилног управљања којим би се систем распрегао до нивоа до кога је то могуће. Такође потребно је применити и робусну регулацију јер комплексност система не дозвољава да се сагледају све постојеће појаве, чак и да се све релевантне појаве у систему могу идентификовати.

Поред конвенционалних техника управљања, интуитивно се намеће примена техника на бази вештачке интелигенције и учења, за управљање решењима која своју инспирацију налазе у природи. У том смеру, потребно је размотрити употребу неуралних мрежа за понављање научених покрета и уочених образаца као и за реализацију сличних покрета. Интуитивна реакције у новонасталим ситуацијама које се опет на основу претходног искуства могу очекивати могу бити реализоване кроз аналитички апарат на бази фази логике.

Коначно, како су сви напори за реализацију антропомиметичких робота уложени ради њихове употребе у људском окружењу, од посебног је интереса размотрити употребу метода као што су импедансно управљање или хибридно управљање позицијом и силом. Кроз ове методе би се на основу компромиса између интензитета контактне силе и одступања од жељеног кретања могао донети закључак о управљачкој акцији свих погона антропомиметичког робота у циљу постизања најбољег могућег понашања роботског механизма у задацима интеракције.

4. Очекивани научни допринос

Очекује се да постигнути резултати у овом истраживању омогуће симулацију и анализу робота са механичком попустљивошћу и антагонистички спрегнутим погонима у бескотактним и контактним задацима. На основу развијеног математичког апарата биће пружена могућност да се уз минималне измене омогући анализа и симулација сличних роботских структура са пасивном попустљивошћу при слободном кретању и интеракцији са околином. Научни доприноси у области управљања антропомиметичким роботима се очекују кроз унапређење постојећих и развој нових метода управљања уз приоритете као што су

енергетска ефикасност и имитација образаца понашања човека. Развијени математички апарат за симулацију комплексног роботског система, прошириће могућности разматрања валидности управљачких алгоритама кроз ефекте какви су инерција услед спрегнутих сегмената робота у истом кинематском ланцу, утицај еластичности трансмисионих елемената на понашање робота, робусност управљања при грешкама моделирања и утицаја спољашњих поремећаја, итд. Технике претходног искуства и учења за управљања антропомиметичким роботом ће бити примењене кроз коришћење такозваних когнитивних управљачких алгоритама – употребу неуралних мрежа и фази логике. Разматрањем и компаративном анализом како развијених конвенционалних тако и когнитивних управљачких метода, очекује се извођење закључка о интегралном приступу управљању оваквих роботских структура кроз искоришћење предности сваке од развијених техника. Коначно биће развијен приступ управљању антропомиметичког робота у контактним задацима. Алгоритми управљања биће тестирани и верификовани кроз симулационе експерименте на софтверу развијеном кроз претходно изведени динамички модел робота за анализу контактних и бескотактних задатака.

5. План истраживања и структура рада

План истраживања у оквиру предложене докторске дисертације се може класификовати кроз следеће активности:

- Преглед и анализа постојећих алата и модела за симулацију хуманоидних робота који разматрају динамику.
- Разматрање приступа и алата у моделирању интеракције робота са окружењем.
- Развој математичког апарата за анализу кретања робота са пасивном попустљивошћу и антагонистички спрегнутим погонима и његова софтверска реализација.
- Разматрање биолошких принципа моторне контроле антагонистички упарених мишића код човека.
- Преглед стања у области конструкције роботских зглобова са променљивом крутошћу и антагонистички спрегнутих погона.
- Преглед стања у области управљања роботским зглобовима са антагонистички спрегнутим погонима.
- Развој и унапређење конвенционалних нелинеарних, мултиваријабилних и робусних управљачких техника за контролу роботског зглоба са антагонистичким погонима и пасивном попустљивошћу
- Развој когнитивних метода управљања роботског зглоба са антагонистичким погонима и пасивном попустљивошћу на основу образаца понашања човека, искуства и учења
- Развој управљачког алгоритма роботског зглоба са антагонистичким погонима и пасивном попустљивошћу у контактним задацима
- Компаративна анализа развијених управљачких метода и предлог интегралног приступа управљању антропомиметичким роботима
- Упоредивање постигнутих резултата са резултатима приказаним у литератури.
- Тестирање резултата на развијеној софтверској платформи антропомиметичког робота за симулацију контактних и бескотактних задатака.

6. Закључак и предлог

У предлогу тезе су на прегледан и јасан начин наведени научни и технички проблеми на које истраживање треба да одговори. Предлогом тезе су прецизно дефинисани практични и научни истраживачки изазови и описана њихова тежина за развој нових роботских система са нагласком на безбедну интеракцију робота у свом окружењу. Такође, у предлогу истраживања концизно су наведени доприноси који се очекују од резултата ове дисертације у области нових роботских механизма који се заснивају на биолошким принципима, њиховог моделирања и анализе и управљања на бази конвенционалних управљачких метода и на основу метода машинског учења и вештачке интелигенције. Наведени научни резултати кандидата Косте Јовановића, његов досадашњи успех на студијама на Електротехничком факултету у Београду недвосмислено указују да је кандидат испунио све потребне суштинске и формалне услове за рад на пријављеној докторској тези.

Нагалашавамо да је предложена тема предложених пројектом „Истраживање и развој амбијентално интелигентних сервисних робота антропоморфних карактеристика“ (ТР35003), финансираним од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

На основу свега наведеног наш закључак је да мастер инжењер електротехнике и рачунарства **Коста М. Јовановић** потпуно испуњава све услове за израду докторске дисертације и потврђујемо научну заснованост предложене теме **„Моделирање и управљање антропомиметичког робота са антагонистичким погонима у контактним и бескотактним задацима“** (енг. **“Modeling and control of the anthropomimetic robot with antagonistic joints in contact and non-contact tasks”**). Сходно томе, предлажемо Наставно-научном већу Електротехничког факултета, Универзитета у Београду да Кости одобри израду докторске дисертације под горе наведеним насловом.

Тема докторске тезе је у оквиру области истраживања у домену роботике уз примене теорија управљања на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду, и у складу са тим предлажемо за ментора др Вељка Поткоњак, редовног професора Електротехничког факултета, Универзитета у Београду.

Београд, 3. април 2014. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

др Вељко Поткоњак, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Мирјана Поповић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

др Александра Родић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт Михајло Пупин