

Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Маје Трумић за израду докторске дисертације.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5019/17-3 од 02.07.2020. године именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Маје Трумић, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом:

„Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота”.
(енг. „*Stiffness estimation and adaptive control of soft robots*”).

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

Подаци о кандидату

Биографски подаци

Маја Трумић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, рођена је 18.09.1993. године у Бору. Тамо завршава основну и средњу школу. У току школовања учествовала је на многобројним такмичењима из математике и физике и освајала бројне награде од којих се истиче трећа награда на републичком такмичењу из математике. Електротехнички факултет у Београду уписала је 2012. године. Дипломирала је на одсеку за Сигнале и системе 2016. године са просечном оценом 9.43 одбранивши дипломски рад под називом „Пројектовање аутопилота за самонавођену летилицу ваздух-земља кратког домета“. Школске 2016/2017. године уписала је мастер студије на Електротехничком факултету у Београду, које завршава 2017. године са просечном оценом 10, и одбрањеним мастер радом „Анализа вибрационих сигнала са мотора мале снаге коришћењем вејвлет анализе“. Током основних и мастер студија одрадила је више стручних пракси: прво на Војнотехничком институту у Београду (у трајању од три месеца), потом у истраживачком центру компаније

Бош у Ренингену, (у трајању од четири месеца) и у постројењу исте компаније у Билу, у Немачкој (у трајању од седам месеци).

Двојне докторске студије уписала је 2017. године на Електротехничком факултету у Београду и на Универзитету у Палерму, у Италији. Област научног истраживања кандидаткиње обухвата адаптивно управљање роботским системима са еластичним погоном и естимацију крутости таквих система. Од априла 2018. ангажована је као стипендиста на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја „Истраживање и развој амбијентално интелигентних робота антропоморфних карактеристика“.

Аутор је четири конференцијска рада и два часописна рада.

Стечено научно-истраживачко искуство

Кандидат Маја Трумић је од 2018. године ангажована као стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја на пројекту ТР35003 – Истраживање и развој интелигентног сервисног робота антропоморфних карактеристика. Као стипендиста Министарства просвете, науке и технолошког развоја учествовао је у пројекту у области роботике са посебним ангажманом на управљању новим системима актуације и естимацији њихових параметара.

У јулу 2018. похађала је курс професора Андрее Серанија „*Adaptive control: analysis and design methods*“ и курс професора Ђузепеа Нотарстефана и Марије Прандини „*Optimization Methods for Decision Making over Networks*“ у оквиру летње школе у Бертинору, Италији, у организацији италијанског Друштва доцената и истраживача из аутоматике (*Societe Italiana Docenti e Ricercatori in Automatica - SIDRA*). У јануару 2020. године пратила је курс професора Хасана Калила под називом „*Introduction to Nonlinear Systems and Control*“, одржан на *Centrale Supélec* у Паризу, а у јулу 2020. године онлајн курс професора Алберта Исидорија и Лоренца Марконија под називом „*Robust and Adaptive Output Regulation for Multivariable and Hybrid Systems*“ у организацији *European Embedded Control Institute*.

Кандидат Маја Трумић је до сада у току докторских студија положила све испите предвиђени планом и програмом и публиковала два часописна и четири конференцијска рада.

- Испити и обавезе предвиђени планом и програмом докторских студија:

Р.Бр.	Испит	Оцена	ЕСПБ
1	Моторна контрола и рехабилитација	10	9
2	Неуралне мреже	10	9
3	Аутоматско резоновање	10	9
4	Аутономни роботски системи без људске посаде	10	9
5	Увод у научни рад	10	6
6	Оптимални и адаптивни стохастички системи	10	9
7	Одабрана поглавља из симболичке алгебре	10	9
8	Теорија роботских система	10	9
9	Аутоматско вођење објеката у простору	10	9
10	Специјални роботски системи	10	9
Р.Бр.	Одрађене обавезе	ЕСПБ	
1	студијски истраживачки рад I	15	
2	научно стручни рад	3	
3	студијски истраживачки рад II	15	

- Списак радова:

Радови у врхунском међународном часопису (M21)

1. **Maja Trumić**, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „Decoupled Nonlinear Adaptive Control of Position and Stiffness for Pneumatic Soft Robots“, The International Journal of Robotics Research (SAGE), 2020, **DOI**: 10.1177/0278364920903787, **IF**: 4.047.
2. Adriano Fagiolini, **Maja Trumić**, Kosta Jovanović „An Input Observer-based Stiffness Estimation Approach for Flexible Robot Joints“, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 5, No. 2, 2020, **DOI**: 10.1109/LRA.2020.2969952, **IF**: 3.6.

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33)

1. **Maja Trumić**, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „, Comparison of Model-Based Simultaneous Position and Stiffness Control Techniques for Pneumatic Soft Robots“, In: Zeghloul S., Laribi M., Sandoval Arevalo J. (eds) Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2020. Mechanisms and Machine Science, vol 84. Springer, Cham. **DOI**: 10.1007/978-3-030-48989-2_24

Саопштење са скупа националног значаја штампано у целини (M63)

1. **Maja Trumić**, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „Adaptivno upravljanje robotom sa elastičnim pogonom“, Zbornik radova 62. Konferencija ETRAN, str. RO1.1 377-380, Jun 2018, Palić, ISBN: 978-86-7466-752-1
2. **Maja Trumić**, Milica Jovanović, Tomislav Šekara, Marko Bošković „Uporedna analiza modifikovanog Smitovog prediktora i optimalno PI regulatora za adaptaciju sistema upravljanja primenom fazno zaključane petlje za temperaturne procese sa dominantnim transportnim kašnjenjem“, *Zbornik radova Infoteh-Jahorina* 2018, str. 460-463, Mart 2018, Jahorina, Bosna i Hercegovina, ISBN: 978-99976-710-1-1
3. Milica Jovanović, **Maja Trumić**, Tomislav Šekara „Primena modifikovane fazno-zaključane petlje za adaptaciju sistema upravljanja temperaturnih procesa“, *Zbornik radova Infoteh-Jahorina* 2018, str. 454-458, Mart 2018, Jahorina, Bosna i Hercegovina, ISBN: 978-99976-710-1-1

Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија је размотрила све претходно наведене резултате рада и стечена искуства кандидата Маје Трумић. На основу приложених докумената и усмене презентације теме докторске дисертације, Комисија је стекла увид у способности кандидата за научно-истраживачи рад и његове могућности да током израде докторске дисертације оствари резултате који ће бити приказани и оцењени од стране међународне научне заједнице. Став Комисије је да кандидат Маја Трумић испуњава све потребне суштинске и формалне услове да приступи изради докторске под наведеном темом.

Предмет и циљ истраживања

Тежња да се постигне или чак надмаши људска спретност и хитрина приликом кретања и обављања манипулационих задатака подстакла је последњих деценија развој робота са уграђеном флексибилношћу. Супротно претходној пракси, када се еластичност робота настојала потиснути, данас се она намерно уводи и подстиче како би се створили безбедни, енергетски оптимизовани и лагани попустљиви роботи [1]. Захваљујући овим особинама попустљиви роботи показују обећавајуће аспекте када су у питању сарадња и интеракција са људима. Тако би стварање радног места које би делили човек и робот имало позитиван друштвени и економски утицај [2], док би сарадња између човека и робота радикално побољшала здравље радника у производњи уколико би им роботи помагали у ношењу тешке опреме [3]. Роботски системи попут Кукиног лаганог робота, са активном контролом попустљивости [4], и друга нова економична решења са доступним кодом, као нпр. Natural

Machine Motion Initiative [5] све чешће се појављују на тржишту, са заједничком тежњом да се ова област брже развија.

Попустљивост ових робота, чија је еластичност концентрисана у зглобовима, може се постићи помоћу неколико различитих механизма [6]. Међу њима, актуатори са променљивом крутошћу (*Variable Stiffness Actuators - VSAs*) делују као најповољније решење за типичне примене [7], надмашујући круте роботе у погледу робусности и односа оптерећења и тежине [8-9]. Попустљивост робота обично се поставља у отвореној спрези, што значи да се карактеристика еластичности попустљивог робота мора знати унапред, било коришћењем аналитичког прорачуна из техничког листа актуатора [10], било извршавањем опсежне идентификације модела [11].

Међутим, чак и у случају да су техничке карактеристике актуатора у почетку поуздане, континуирано хабање изазвано деловањем сила на еластичне елементе, температурне промене и хистерезис обртног момента доводе временом до додатних нетачности [12]. Са друге стране, управљање крутошћу у затвореној спрези има неколико предности, јер пружа потпуну повратну информацију о стањима и динамичком односу између актуатора и зглобова робота. У литератури је предложено неколико приступа за управљање позицијом и крутошћу зглобова, као што су статичка и динамичка линеаризација помоћу повратне спреге (*feedback linearization*) [13-14] и *backstepping* закон управљања [15]. Сви горе наведени приступи претпостављају да је динамички модел тачно познат, што компликује њихову практичну имплементацију.

Циљ истраживања је двострук. Прво, истраживање ће бити усмерено ка процени крутости робота, из разлога што ова променљива није мерљива. Супротно тренутној пракси где се изводи опсежно идентификовање модела крутости, циљ овог истраживања је естимација крутости у реалном времену коришћењем минималних информација о роботском систему. Потом, истраживање ће се усмерити ка истовременом и декуплованом управљању положаја и крутости попустљивог робота. Закон управљања мора осигурати робусно, асимптотско праћење задате референце позиције и крутости упркос недостатку прецизног знања о инерцијалним и геометријским параметрима динамичког модела робота. Поред тога, ради практичне примене, алгоритам не би требало да се ослања на информације о вишим изводима положаја и крутости зглобова. С тим у виду, користиће се закон о адаптивном управљању ради постизања жељеног понашања попустљивог роботског система.

Што се тиче изазова процене крутости, истраживање у овој области је још увек у самом почетку. Међутим, подручје примене је обимно, будући да би било од велике користи за истраживање телеоперацијских робота, процену крутости људских удова и манипулацију роботима у контактним задацима. Иако су предложена одређена обећавајућа решења у области естимације крутости зглобова робота [16-17] и Картезијанске крутости [18], још

уек постоји доста могућности за побољшање процена крутости развијањем алгоритама којима ће требати мање информација са сензора монтираним на страни погона зглоба робота [19] или који ће се ослањати само на информације са стране сегмента робота (тзв. неинвазивне методе [20]). Доприноси истраживања који се тичу адаптивног управљања почиваће на темељу истраживања у [21]. У поређењу са тим истраживањем, прво проширење ће се заснивати на томе да ће се крутошћу робота управљати у затвореној спреси, што би требало да допринесе повећању целокупне безбедности. Друга привлачна карактеристика биће дизајн закона управљања који ће користити додатни степен слободе за декупловање праћења команди положаја од команди крутости. У поређењу са приступом линеаризације помоћу повратне спреге [13-14], ово истраживање засниваће се на адаптивном учењу параметара динамичког модела, па је реално претпоставити да је остварива експериментална верификација истовременог и деуплованог управљања позицијом и крутошћу робота.

- [1] Bicchi, Antonio, and Giovanni Tonietti. "Fast and "soft-arm" tactics [robot arm design]." *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 11, No. 2, 2004, pp. 22-33.
- [2] Ajoudani, Arash, Andrea Maria Zanchettin, Serena Ivaldi, Alin Albu-Schäffer, Kazuhiro Kosuge, and Oussama Khatib. "Progress and prospects of the human-robot collaboration." *Autonomous Robots* (Springer), Vol. 42, No. 5, 2018, pp. 957-975.
- [3] Cherubini, Andrea, Robin Passama, André Crosnier, Antoine Lasnier, and Philippe Fraisse. "Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Elsevier) Vol. 40, 2016, pp. 1-13.
- [4] Bischoff, Rainer, Johannes Kurth, Günter Schreiber, Ralf Koeppel, Alin Albu-Schäffer, Alexander Beyer, Oliver Eiberger et al. "The KUKA-DLR Lightweight Robot arm-a new reference platform for robotics research and manufacturing.", *ISR (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, 2010, pp. 1-8.
- [5] C. Della Santina, C. Piazza, G. M. Gasparri, M. Bonilla, M. G. Catalano, G. Grioli, M. Garabini, and A. Bicchi, "The quest for natural machine motion: An open platform to fast-prototyping articulated soft robots," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 24, No. 1, 2017, pp. 48-56.
- [6] Vanderborght, Bram, Alin Albu-Schäffer, Antonio Bicchi, Etienne Burdet, Darwin G. Caldwell, Raffaella Carloni, M. G. Catalano et al. "Variable impedance actuators: A review." *Robotics and autonomous systems* Vol. 61, No. 12, 2013, pp. 1601-1614.
- [7] Grioli, Giorgio, Sebastian Wolf, Manolo Garabini, Manuel Catalano, Etienne Burdet, Darwin Caldwell, Raffaella Carloni et al. "Variable stiffness actuators: The user's point of view." *The International Journal of Robotics Research* (Sage), Vol. 34, No. 6, 2015, pp. 727-743.
- [8] Bicchi, Antonio, Giovanni Tonietti, and E. Piaggio. "Design, realization and control of soft robot arms for intrinsically safe interaction with humans." In *Proc. IARP/RAS Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments*, 2002, pp. 79-87.

- [9] Albu-Schäffer, Alin, Sami Haddadin, Ch Ott, Andreas Stemmer, Thomas Wimböck, and Gerhard Hirzinger. "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments." *Industrial Robot: an international journal*, Vol. 34, No. 5, 2007, pp. 376-385.
- [10] Angelini, Franco, Cosimo Della Santina, Manolo Garabini, Matteo Bianchi, Gian Maria Gasparri, Giorgio Grioli, Manuel Giuseppe Catalano, and Antonio Bicchi. "Decentralized trajectory tracking control for soft robots interacting with the environment." *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 34, No. 4, 2018, pp. 924-935.
- [11] Lukić, Branko Z., Kosta M. Jovanović, and Goran S. Kvaščev. "Feedforward neural network for controlling qbmove maker pro variable stiffness actuator." *13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, 2016, pp. 1-4. IEEE.
- [12] Ruderman, Michael, Torsten Bertram, and Makoto Iwasaki. "Modeling, observation, and control of hysteresis torsion in elastic robot joints." *Mechatronics* Vol. 24, No. 5, 2014, pp. 407-415.
- [13] De Luca, Alessandro, and Pasquale Lucibello. "A general algorithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints." In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, 1998, pp. 504-510.
- [14] Potkonjak, Veljko, Bratislav Svetozarevic, Kosta Jovanovic, and Owen Holland. "The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic systems." *International Journal of Advanced Robotic Systems* Vol. 8, No. 5, 2011, pp. 143-155.
- [15] Petit, Florian, Andreas Daasch, and Alin Albu-Schäffer. "Backstepping control of variable stiffness robots.", *Transactions on Control Systems Technology (IEEE)*, Vol. 23, No. 6, 2015, pp. 2195-2202.
- [16] Flacco, Fabrizio, Alessandro De Luca, Irene Sardellitti, and Nikos G. Tsagarakis. "On-line estimation of variable stiffness in flexible robot joints.", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 31, No. 13, 2012, pp. 1556-1577.
- [17] Ménard, Tomas, Giorgio Grioli, and Antonio Bicchi. "A stiffness estimator for agonistic-antagonistic variable-stiffness-actuator devices." *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, No. 5, 2014, pp. 1269-1278.
- [18] Diolaiti, Nicola, Claudio Melchiorri, and Stefano Stramigioli. "Contact impedance estimation for robotic systems.", *Transactions on Robotics (IEEE)*, Vol. 21, No. 5, 2005, pp. 925-935.
- [19] Marcucci, Tobia, Cosimo Della Santina, Marco Gabiccini, and Antonio Bicchi. "Towards minimum-information adaptive controllers for robot manipulators.", *American Control Conference (IEEE)*, 2017, pp. 4209-4214.
- [20] Grioli, Giorgio, and Antonio Bicchi. "A real-time parametric stiffness observer for VSA devices.", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 5535-5540.
- [21] Tonietti, Giovanni, and Antonio Bicchi. "Adaptive simultaneous position and stiffness control for a soft robot arm." In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, 2002, pp. 1992-1997.

Полазне хипотезе

Полазне хипотезе се заснивају на следећем:

- Роботи погођени биолошки инспирасним актуаторима, тако да су и положај и крутост променљиви, могу да обављају задатке безбедно и ефикасно у непосредном окружењу човека. Ово је могуће из разлога што је инерција сегмента одвојена од инерције на страни мотора помоћу флексибилних преносних елемената, смањујући тиме кинетичку енергију која би настала приликом судара робота и човека [1].
- Затварање спреге по положају и крутости робота позитивно утиче на укупну сигурност. Када се робот ближи људском оператеру, сигурност се постиже смањењем крутости и брзине робота. Слично, чвршћи робот постиже већу брзину када је далеко од оператера [2-4].
- Адаптивно управљање положајем и крутошћу робота омогућава робусност на непрецизно познавање параметара динамике робота, притом захтевајући само информације о положају и брзини зглоба [5].
- Променљиве стања на страни мотора (актуисане) и променљиве на страни сегмента (неактуисане) нису инерцијално, већ само еластично купловане, што доводи до поједностављења динамичког модела робота који се користи за пројектовање закона управљања. Штавише, гравитациона потенцијална енергија и варијација инерцијалне матрице робота зависе само од положаја сегмената [6].
- Да би се затворила спрега по крутости, претпоставља се да се крутост може проценити, будући да није мерљива. У ту сврху се претпоставља да је карактеристика еластичног преноса параметризована у односу на положај сегмента код робота са пнеуматским погоном [7], док је код робота са електричним погоном [8] параметризована у односу на положај сегмента и мотора. Додатно, крутости различитих зглобова нису међусобно купловане [9].

[1] De Luca, Alessandro, and Wayne J. Book. "Robots with flexible elements.", Handbook of Robotics (Springer), Ch. 11, 2016, pp. 243-282.

[2] Hogan, Neville. "Impedance control: An approach to manipulation: Part II - Implementation.", Journal of dynamic systems, measurement, and control, Vol. 107, No. 1, 1985, pp. 8-16.

[3] Albu-Schaffer, Alin, and Gerd Hirzinger. "Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots." In Proceedings International Conference on Robotics and Automation (IEEE), Vol. 1, 2002, pp. 657-663.

- [4] Ott, Christian, Alin Albu-Schaffer, Andreas Kugi, and Gerd Hirzinger. "On the passivity-based impedance control of flexible joint robots." , Transactions on Robotics (IEEE), Vol. 24, No. 2, 2008, pp. 416-429.
- [5] Slotine, Jean-Jacques E., and Weiping Li, Applied nonlinear control (Prentice Hall), Vol. 199, No. 1, 1991.
- [6] Albu-Schäffer, Alin, and Antonio Bicchi. "Actuators for soft robotics." Handbook of Robotics (Springer), Ch. 21, 2016, pp. 499-530.
- [7] Colbrunn, Robb William, Gabriel M. Nelson, and Roger D. Quinn. "Design and control of a robotic leg with braided pneumatic actuators.", Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (IEEE), Vol. 2, 2001, pp. 992-998.
- [8] Migliore, Shane A., Edgar A. Brown, and Stephen P. DeWeerth. "Novel nonlinear elastic actuators for passively controlling robotic joint compliance." Journal of Mechanical Design, Vol. 129, No. 4, 2007, pp. 406-412.
- [9] Palli, Gianluca, Claudio Melchiorri, and Alessandro De Luca. "On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness.", International conference on robotics and automation (IEEE), 2008, pp. 1753-1759.

Методе истраживања

Поводом процене крутости, упоредиће се најсавременији алгоритми узимајући у обзир следеће критеријуме: потреба за информацијама о положају и брзини мотора или сегмента, конвергенција естимације еластичног момента/крутости и могућност процене крутости завршног уређаја робота. Затим, развијено ново решење за естимацију крутости ће бити верификовано и у симулацијама и на експерименталној поставци. Тачност процене може се проверити упоређивањем добијених резултата са моделом крутости који је дат у техничком листу произвођача или са крутошћу израчунатој на основу података са сензора силе/момента постављеног на излазној осовини зглоба робота. Критеријуми попут средње квадратне грешке и средње квадратне релативне грешке користиће се за нумерички приказ разлике између процењене и стварне вредности крутости.

Истраживање ће се наставити детаљном анализом најсавременијих решења за управљање положајем и крутошћу попустљивог робота, посебно адаптивном закону управљања. Затим ће бити дизајниран нови закон адаптивног управљања тако да се и положај и крутост сваког зглоба попустљивог робота управљају истовремено и декупловано, осигуравајући асимптотско праћење жељених вредности положаја и крутости. Такав закон управљања прво ће бити тестиран у симулационом окружењу Симулинк-а, на попустљивом роботу са више степени слободе, а након тога и на експерименталној

поставци. Перформансе алгоритма ће се проценити на основу грешке и брзине праћења различитих референци положаја и крутости.

Очекивани научни доприноси

Очекивани научни доприноси тезе су следећи:

- Систематски преглед литературе и метода из области процене крутости попустљивих робота.
- До сада је модел крутости у зглобу попустљивог робота погоњеним актуатором са променљивом крутошћу добијан извођењем опсежних процедура идентификације модела актуатора. Поуздана процена крутости у зглобовима робота у реалном времену би смањила потрошено време и поједноставила поступак неопходан за добијање почетног модела крутости за погонске механизме променљиве крутости. Поред тога, коришћењем естиматора крутости у реалном времену корисник може добити ваљану процену крутости зглоба робота чак и када се догоди промена у еластичном преносу услед собне температуре или хабања опруга.
- Напредак у процени крутости робота има потенцијал да знатно утиче на поступке процене крутости људских удова. Прво, то би довело до побољшања разумевања и бољег суочавања са Паркинсоновом болешћу. Друго, помоћу знања о људској крутости, управљање телеоперацијским роботим би постало лакше и остварили би се бољи резултати, јер се за сада користи опсежан и веома персонализован поступак за израчунавање крутости удова. У то име, недавни резултати показују да када се крутост роботске руке активира, робот успева да успешно извршава задатке везане за рупу.
- У светлу недавног открића да попустљиви роботи могу у будућности постати блиски сарадници људи у индустријском и кућном окружењу у циљу побољшања производње или бриге о старијима, од изузетног је значаја да такви роботи остану безбедни и прилагодљиви окружењу. Ова теза ће размотрити развој одговарајућег закона о адаптивном управљању у циљу повећања сигурности целокупног роботског система.
- Прва експериментална валидација истовременог и декуплованог управљања положајем и крутошћу попустљивог робота, што ће пружити практичан увид у предности и недостатке те врсте управљања.

План истраживања

Истраживање ће се спровести пратећи главну идеју о управљању попустљивим роботим на начин да се могу осигурати и безбедност и добре перформансе робота. У првој фази истраживања врши се процена крутости, јер се та променљива не може мерити. Друга фаза истраживања оријентисана је ка развоју одговарајућег адаптивног управљања које омогућава истовремено и декупловано праћење положаја и крутости робота са недовољно познатим динамичким параметрима робота.

1) Прва фаза - процена крутости у неким зглобовима робота

Да би се омогућило затварање спреге по крутости, потребно је проценити њену вредност у флексибилним зглобовима робота или на завршном уређају.

Први корак је преглед литературе и поређење претходно развијених алгоритама (параметарски и непараметарски приступи, приступ естимацији са стране погона или сегмената, директна процена крутости или индиректно преко естимације еластичног обртног момента).

Након што се утврде предности и недостаци тренутних решења, наставиће се са њиховим унапређивањем, развијањем алгорита који захтева мање информација са сензора и мање параметара за подешавање.

Коначно, перформансе предложеног естиматора ће се испитивати помоћу симулација и експеримената, посматрајући различите случајеве и упоређујући исход естимације са стварним вредностима крутости у зглобовима.

2) Друга фаза - декупловано и симултано адаптивна управљање позицијом и крутошћу

Почетни корак у истраживању је анализа литературе која покрива теме о попустљивим роботима (погонски системи: актуатори променљиве крутости, серијски еластични актуатори; врсте погона: пнеуматски, хидраулички и електрични погони; типови попустљивих робота: попустљиви роботи са еластичношћу концентрисаном у зглобовима и попустљиви роботи са еластичношћу распоређеном дуж сегмента) и закони управљања (засновани на моделу: динамичка и статичка линеаризација по повратној спрези, back-stepping; и без информације о моделу: нелинеарно адаптивно управљање, управљање помоћу предикције модела, feed-forward управљање).

Као други корак, врши се извођење одговарајућег закона адаптивног управљања, тако да нису потребни виши изводи позиције и крутости. Управљање овим двема величинама је декупловано и робусно у односу на непрецизне динамичке параметре. Такође, формални доказ стабилности за асимптотско праћење позиције и крутости ће бити изведен.

На крају, трећи корак је верификација изведеног закона управљања и у симулацијама и у експериментима. Робот са једним и више степени слободе ће се користити за приказивање перформанси алгорита и упоређивање са различитим стратегијама управљања.

Закључак и предлог

На основу изложеног, Комисија констатује да кандидат Маја Трумић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испуњава све потребне услове за израду докторске дисертације под насловом „Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота“. Поред испуњених формалних услова, кандидат је демонстрирао способност систематичног приступа анализи проблема и теоријским и практичним знањима у области моделовања и управљања роботским системима и естимацији крутости код робота са попустљивим актуаторима, као и излагању резултата у научној заједници. Предложена тема је врло актуелна и заснована како на истраживачким активностима научне заједнице тако и на комерцијалним потребама тржишта. Научни доприноси кандидата су од значаја за развој нове генерације колаборативних робота чије су предности засноване на технологији актуатора променљиве крутости и проширењу могућности њихове примене.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Маји Трумић, мастер инжењеру електротехнике и рачунарства, одобри израду докторске дисертације под насловом „Естимација крутости и адаптивно управљање код попустљивих робота“, под менторством др Косте Јовановића, доцента на Електротехничком факултету Универзитета у Београду и др Адриана Фађолинија, доцента на Одсеку за инжењерство Универзитета у Палерму, у Италији.

У Београду, 27.08.2020. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Коста Јовановић, доцент,
Универзитет у Београду -
Електротехнички факултет



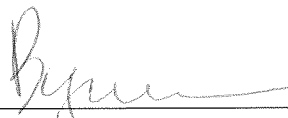
др Жељко Ћуровић, редовни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички
факултет



др Адриано Фађолини, доцент,
Универзитет у Палерму –
Одсек за инжењерство



др Вељко Потокоњак, редовни професор,
Универзитет Метрополитан у Београду



др Слободан Вукосавић, редовни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички
факултет

University of Belgrade
School of Electrical Engineering

TO THE TEACHING-SCIENTIFIC COUNCIL

Subject title: Eligibility of the topic and candidate Maja Trumić for the preparation of a doctoral dissertation.

By the decision of the Teaching-Scientific Council of the School of Electrical Engineering no. 5019/17-3 dated 02.07.2020., we were appointed to be members of the Commission for the evaluation of the eligibility of the topic and the candidate Maja Trumić, master engineer of electrical engineering and computer science, for the preparation of a doctoral dissertation and scientific basis of the topic entitled:

„Stiffness estimation and adaptive control of soft robots ”.

(Serbian „*Estimacija krutosti i adaptivno upravljanje kod popustljivih robota*”).

Based on the material attached to the candidate's request, the Commission submits the following

REPORT

Information about the Candidate

Biographical data

Maja Trumić, master engineer of electrical engineering and computer science, was born on September 18, in 1993 in Bor, where she finished both primary and secondary school. During her schooling, she participated in numerous competitions in mathematics and physics and won numerous awards, among which stands out the third prize at the national competition in mathematics. She enrolled at the School of Electrical Engineering in Belgrade in 2012. She graduated from the Department of Signals and Systems in 2016 with an average grade of 9.43, defending her bachelor's dissertation entitled "Design of an autopilot for a self-guided air-to-ground short-range missiles." In 2016 she enrolled in master's studies at the School of Electrical Engineering in Belgrade, which she completed in 2017 with an average grade of 10 and defended her master's thesis "Analysis of vibration signals from low-power motors using wavelet analysis".

During her undergraduate and master studies, she completed several professional internships: first at the Military Technical Institute in Belgrade (in duration of three months), then at Bosch Research Center in Renningen, Germany, (four months) and at the Bosch plant in Buel, in Germany (seven months).

She enrolled in dual doctoral studies in 2017 at the School of Electrical Engineering in Belgrade and at the University of Palermo, Italy. The field of scientific research of the candidate includes adaptive control of soft robotic systems and estimation of stiffness of such systems. Since April 2018, she has been engaged as a scholarship holder on the project of the Ministry of Education, Science and Technological Development "Research and development of ambientally intelligent robots with anthropomorphic characteristics".

She is the author of four conference papers and two journal papers.

Acquired scientific research experience

Candidate Maja Trumić has been engaged as a scholarship holder of the Ministry of Education, Science and Technological Development since 2018 on the project TR35003 - Research and development of an intelligent service robot with anthropomorphic characteristics. As a scholarship holder of the Ministry of Education, Science and Technological Development, she participated in a project in the field of robotics with a special engagement in the management of new actuation systems and estimation of their parameters.

In July 2018, she attended the course of Professor Andrea Serrani "Adaptive control: analysis and design methods" and the course of professors Giuseppe Notarstefano and Maria Prandini "Optimization Methods for Decision Making over Networks" within the summer school in Bertinoro, Italy, organized by the Italian Association of Assistant Professors and Researchers in Automation (Società Italiana Docenti e Ricercatori in Automatica - SIDRA). In January 2020, she attended a course by Professor Hassan Kalil entitled "Introduction to Nonlinear Systems and Control", held at the Centrale Supélec in Paris, and in July 2020 an online course by Professors Alberto Isidori and Lorenzo Marconi entitled "Robust and Adaptive Output Regulation for Multivariable and Hybrid Systems" organized by the European Embedded Control Institute.

Candidate Maja Trumić has successfully passed all the exams provided by the plan and program of doctoral studies and published two journal and four conference papers.

- Exams and obligations provided by the plan and program of doctoral studies:

Р.Бр.	Испит	Оцена	ЕСПБ
1	Motor Control and Rehabilitation	10	9
2	Neural Networks	10	9
3	Automated Reasoning	10	9
4	Unmanned Autonomous Robotic Systems	10	9
5	Introduction to Scientific Research	10	6
6	Optimal and Adaptive Stochastic Systems Control	10	9
7	Selected Topics in Symbolic Algebra	10	9
8	Theory of Robotics Systems	10	9
9	Automatic Navigation of Objects in Space	10	9
10	Special Purpose Robotic Systems	10	9
Р.Бр.	Одрађене обавезе	ЕСПБ	
1	research work related to the topic of the final thesis I	15	
2	a scientific paper	3	
3	research work related to the topic of the final thesis II	15	

- List of publications:

Papers in a top international journal (M21)

1. **Maja Trumić**, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „Decoupled Nonlinear Adaptive Control of Position and Stiffness for Pneumatic Soft Robots“, The International Journal of Robotics Research (SAGE), 2020, **DOI**: 10.1177/0278364920903787, **IF**: 4.047.
2. Adriano Fagiolini, **Maja Trumić**, Kosta Jovanović „An Input Observer-based Stiffness Estimation Approach for Flexible Robot Joints“, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 5, No. 2, 2020, **DOI**: 10.1109/LRA.2020.2969952, **IF**: 3.6.

Press release from the international meeting printed in its entirety (M33)

1. **Maja Trumić**, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „Comparison of Model-Based Simultaneous Position and Stiffness Control Techniques for Pneumatic Soft Robots“, In: Zegloul S., Laribi M., Sandoval Arevalo J. (eds) Advances in Service and Industrial Robotics. RAAD 2020. Mechanisms and Machine Science, vol 84. Springer, Cham. **DOI**: 10.1007/978-3-030-48989-2_24

Press release from the national meeting printed in its entirety (M63)

1. **Maja Trumić**, Kosta Jovanović, Adriano Fagiolini „Adaptivno upravljanje robotom sa elastičnim pogonom“, Zbornik radova 62. Conference ETRAN, str. RO1.1 377-380, June 2018, Palić, ISBN: 978-86-7466-752-1
2. **Maja Trumić**, Milica Jovanović, Tomislav Šekara, Marko Bošković „Uporedna analiza modifikovanog Smitovog prediktora i optimalno PI regulatora za adaptaciju sistema upravljanja primenom fazno zaključane petlje za temperaturne procese sa dominantnim transportnim kašnjenjem“, *Zbornik radova Infoteh-Jahorina* 2018, str. 460-463, March 2018, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, ISBN: 978-99976-710-1-1
3. Milica Jovanović, **Maja Trumić**, Tomislav Šekara „Primena modifikovane fazno-zaključane petlje za adaptaciju sistema upravljanja temperaturnih procesa“, *Zbornik radova Infoteh-Jahorina* 2018, str. 454-458, March 2018, Jahorina, Bosnia and Herzegovina, ISBN: 978-99976-710-1-1

Assessment of the candidate's eligibility to work on the proposed topic

The commission reviewed all the previously mentioned results of the work and the gained experiences of the candidate Maja Trumić. Based on the attached documents and oral presentation of the topic of the doctoral dissertation, the Commission gained insight into the ability of the candidate for scientific research work and her ability to achieve results during the preparation of the doctoral dissertation which will be presented and evaluated by the international scientific community. The position of the Commission is that the candidate Maja Trumić fulfills all the necessary essential and formal conditions to start drafting a doctoral dissertation on the mentioned topic.

Subject, aim, and significance of the research

The aspiration to achieve or even surpass human dexterity and promptness in performing motion and manipulation tasks has fostered the development of robots with embedded flexibility in the last decades. Contrary to previous practice, when robots' elasticity was sought to be suppressed, nowadays it is purposely introduced and encouraged in order to create human-friendly, energy-optimized, and lightweight soft robots [1]. Thanks to these properties, soft robots have shown promising aspects as far as it concerns the assistance and safe interaction with humans. Creating a shared human-robot workplace would have positive social and economic influence [2], while human-robot collaboration would radically improve the health of manufacturing workers if robots would assist them in carrying heavy equipment [3]. Robotics systems such as Kuka's lightweight robot, endowed with active compliance control [4], and other novel cost-effective, open-source solutions, including e.g. the products by Natural Machine Motion Initiative [5], are now emerging on the market, all sharing the common aspiration to empower faster development of this field.

Compliance of soft robots, with flexibility concentrated at joints, can be achieved by several different mechanisms [6]. Among them, Variable Stiffness Actuators (VSA) seem to be most auspicious in typical applications [7], over-performing rigid robots regarding robustness and the load-to-weight ratio [8-9]. The compliance of a soft robot is usually set in an open loop, which means that the elastic characteristic of a soft robot has to be obtained in advance, either by using the analytical calculation from the datasheet of the VSA [10], or performing extensive model identification [11]. However, even in the case that the provided datasheets are initially reliable, the continuous wear induced by the impact of forces, acting on the elastic elements, the temperature drifts, and the torque hysteresis eventually result in additional inaccuracies [12]. On the contrary, closed-loop stiffness control has several benefits, as it provides full state feedback and information about the dynamical relation between the actuation system and joints. Several approaches have been proposed for joint stiffness and position control such as static and dynamic feedback linearization approach [13-14], and backstepping control law [15]. All the above-mentioned approaches assume that the dynamic model is precisely known, which complicates their practical implementations.

The aim of the research will be twofold. First, the research will be steered towards estimating the value of a robot's stiffness, since this variable is not measurable. Opposite to the current practice of performing extensive offline identification of the stiffness model, the goal of this research is to achieve the online stiffness estimation by using minimum information about the robotic system. Secondly, the challenge to simultaneously control in a decoupled way both position and stiffness of a soft robot will be addressed. Such control law needs to ensure robust asymptotic tracking with the lack of precise knowledge about inertial and geometric parameters of a robot dynamic model. Besides, for the sake of practical implementation, the -control algorithm should not include the information about higher derivatives of joints' position and stiffness. To that purpose, the adaptive control law will be exploited to achieve the desired behavior of a soft robotic system.

As it concerns the challenge of stiffness estimation, the research within this field is still in its very beginning. However, the significance of this field is broad since it would be highly beneficial for the research on teleoperating robots, estimating stiffness in human limbs, and manipulation of a robot in the contact tasks. While certain promising solutions have been proposed in the area of flexible robot joint [16-17] and Cartesian [18] stiffness estimation, there are still many great possibilities for improving the stiffness estimation process by developing algorithms that will need less information from the sensors mounted on the drive side of robot joint [19], or lean only on the information from the link side of robot (so-called *non-invasive methods* [20]).

The contributions of the research concerning adaptive control will lay on the foundation of the work in [21]. Compared to that research, a first extension will stem in the fact that the robot's stiffness will be controlled in closed-loop, which is supposed to benefit the overall system safety. A second appealing feature will be to design such control law that will use the additional control degree of freedom to decouple the tracking of position commands from stiffness ones. Compared to the feedback linearization approach [13-14], this research will be based on the adaptive learning of dynamic model parameters, hence it is presumable that experimental verification of simultaneous and decoupled control of robot's position and stiffness will be possible, which would be the first shown experimentally.

- [1] Bicchi, Antonio, and Giovanni Tonietti. "Fast and "soft-arm" tactics [robot arm design]." *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 11, No. 2, 2004, pp. 22-33.
- [2] Ajoudani, Arash, Andrea Maria Zanchettin, Serena Ivaldi, Alin Albu-Schäffer, Kazuhiro Kosuge, and Oussama Khatib. "Progress and prospects of the human-robot collaboration." *Autonomous Robots (Springer)*, Vol. 42, No. 5, 2018, pp. 957-975.
- [3] Cherubini, Andrea, Robin Passama, André Crosnier, Antoine Lasnier, and Philippe Fraisse. "Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction." *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (Elsevier)* Vol. 40, 2016, pp. 1-13.
- [4] Bischoff, Rainer, Johannes Kurth, Günter Schreiber, Ralf Koeppe, Alin Albu-Schäffer, Alexander Beyer, Oliver Eiberger et al. "The KUKA-DLR Lightweight Robot arm-a new reference platform for robotics research and manufacturing.", *ISR (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, 2010, pp. 1-8.
- [5] C. Della Santina, C. Piazza, G. M. Gasparri, M. Bonilla, M. G. Catalano, G. Grioli, M. Garabini, and A. Bicchi, "The quest for natural machine motion: An open platform to fast-prototyping articulated soft robots," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 24, No. 1, 2017, pp. 48-56.
- [6] Vanderborght, Bram, Alin Albu-Schäffer, Antonio Bicchi, Etienne Burdet, Darwin G. Caldwell, Raffaella Carloni, M. G. Catalano et al. "Variable impedance actuators: A review." *Robotics and autonomous systems* Vol. 61, No. 12, 2013, pp. 1601-1614.
- [7] Grioli, Giorgio, Sebastian Wolf, Manolo Garabini, Manuel Catalano, Etienne Burdet, Darwin Caldwell, Raffaella Carloni et al. "Variable stiffness actuators: The user's point of view." *The International Journal of Robotics Research (Sage)*, Vol. 34, No. 6, 2015, pp. 727-743.
- [8] Bicchi, Antonio, Giovanni Tonietti, and E. Piaggio. "Design, realization and control of soft robot arms for intrinsically safe interaction with humans." In *Proc. IARP/RAS Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments*, 2002, pp. 79-87.
- [9] Albu-Schäffer, Alin, Sami Haddadin, Ch Ott, Andreas Stemmer, Thomas Wimböck, and Gerhard Hirzinger. "The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments." *Industrial Robot: an international journal*, Vol. 34, No. 5, 2007, pp. 376-385.
- [10] Angelini, Franco, Cosimo Della Santina, Manolo Garabini, Matteo Bianchi, Gian Maria Gasparri, Giorgio Grioli, Manuel Giuseppe Catalano, and Antonio Bicchi. "Decentralized trajectory tracking control for soft robots interacting with the environment." *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 34, No. 4, 2018, pp. 924-935.
- [11] Lukić, Branko Z., Kosta M. Jovanović, and Goran S. Kvaščev. "Feedforward neural network for controlling qbmove maker pro variable stiffness actuator." *13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, 2016, pp. 1-4. IEEE.
- [12] Ruderman, Michael, Torsten Bertram, and Makoto Iwasaki. "Modeling, observation, and control of hysteresis torsion in elastic robot joints." *Mechatronics* Vol. 24, No. 5, 2014, pp. 407-415.
- [13] De Luca, Alessandro, and Pasquale Lucibello. "A general algorithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints." In *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, 1998, pp. 504-510.
- [14] Potkonjak, Veljko, Bratislav Svetozarevic, Kosta Jovanovic, and Owen Holland. "The puller-follower control of compliant and noncompliant antagonistic tendon drives in robotic systems." *International Journal of Advanced Robotic Systems* Vol. 8, No. 5, 2011, pp. 143-155.

- [15] Petit, Florian, Andreas Daasch, and Alin Albu-Schäffer. "Backstepping control of variable stiffness robots.", *Transactions on Control Systems Technology (IEEE)*, Vol. 23, No. 6, 2015, pp. 2195-2202.
- [16] Flacco, Fabrizio, Alessandro De Luca, Irene Sardellitti, and Nikos G. Tsagarakis. "On-line estimation of variable stiffness in flexible robot joints.", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 31, No. 13, 2012, pp. 1556-1577.
- [17] Ménard, Tomas, Giorgio Grioli, and Antonio Bicchi. "A stiffness estimator for agonistic-antagonistic variable-stiffness-actuator devices." *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 30, No. 5, 2014, pp. 1269-1278.
- [18] Diolaiti, Nicola, Claudio Melchiorri, and Stefano Stramigioli. "Contact impedance estimation for robotic systems.", *Transactions on Robotics (IEEE)*, Vol. 21, No. 5, 2005, pp. 925-935.
- [19] Marcucci, Tobia, Cosimo Della Santina, Marco Gabiccini, and Antonio Bicchi. "Towards minimum-information adaptive controllers for robot manipulators.", *American Control Conference (IEEE)*, 2017, pp. 4209-4214.
- [20] Grioli, Giorgio, and Antonio Bicchi. "A real-time parametric stiffness observer for VSA devices.", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 5535-5540.
- [21] Tonietti, Giovanni, and Antonio Bicchi. "Adaptive simultaneous position and stiffness control for a soft robot arm." In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, 2002, pp. 1992-1997.

The starting hypothesis

The starting hypotheses are based on the following:

- Robots driven by biologically-inspired actuators, such that both position and stiffness are variable, can perform safely and efficiently within the anthropic environment. It is possible since link inertia is decoupled from the inertia on the motor side by flexible transmission elements, thus reducing the total kinetic energy of the robot [1].
- Closing the loop on both the position and stiffness of a robot positively impacts the overall safety. When a robot is closer to a human operator, safety is achieved by lowering the robot's stiffness and velocity. Similarly, a stiffer robot achieves higher speed when far from the operator [2-4].
- Adaptively controlling a robot's position and stiffness variables allows robustness to the uncertainties of a soft robot dynamics, requiring only a joint's position and velocity information [5].
- There is no inertial coupling, but only elastic coupling between link-side (non-actuated) and motor-side (actuated) states, which leads to the simplifications of the robot dynamic model used for the design of control law. Moreover, gravity potential energy and variation of the robot's inertia matrix depend only on links' positions [6].
- In order to close the loop on stiffness, the premise that this variable could be estimated is made, since stiffness is not measurable. To that purpose, it is assumed that elastic transmission characteristic is parameterized with respect to position of link for robots with

pneumatic drive [7], while for robots with electric drive [8] it is parameterized with respect to positions of link and drives. Moreover, stiffnesses of different joints are not coupled [9].

- [1] De Luca, Alessandro, and Wayne J. Book. "Robots with flexible elements.", *Handbook of Robotics* (Springer), Ch. 11, 2016, pp. 243-282.
- [2] Hogan, Neville. "Impedance control: An approach to manipulation: Part II - Implementation.", *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, Vol. 107, No. 1, 1985, pp. 8-16.
- [3] Albu-Schaffer, Alin, and Gerd Hirzinger. "Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots." In *Proceedings International Conference on Robotics and Automation (IEEE)*, Vol. 1, 2002, pp. 657-663.
- [4] Ott, Christian, Alin Albu-Schaffer, Andreas Kugi, and Gerd Hirzinger. "On the passivity-based impedance control of flexible joint robots." , *Transactions on Robotics (IEEE)*, Vol. 24, No. 2, 2008, pp. 416-429.
- [5] Slotine, Jean-Jacques E., and Weiping Li, *Applied nonlinear control* (Prentice Hall), Vol. 199, No. 1, 1991.
- [6] Albu-Schäffer, Alin, and Antonio Bicchi. "Actuators for soft robotics." *Handbook of Robotics* (Springer), Ch. 21, 2016, pp. 499-530.
- [7] Colbrunn, Robb William, Gabriel M. Nelson, and Roger D. Quinn. "Design and control of a robotic leg with braided pneumatic actuators.", *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (IEEE)*, Vol. 2, 2001, pp. 992-998.
- [8] Migliore, Shane A., Edgar A. Brown, and Stephen P. DeWeerth. "Novel nonlinear elastic actuators for passively controlling robotic joint compliance." *Journal of Mechanical Design*, Vol. 129, No. 4, 2007, pp. 406-412.
- [9] Palli, Gianluca, Claudio Melchiorri, and Alessandro De Luca. "On the feedback linearization of robots with variable joint stiffness.", *International conference on robotics and automation (IEEE)*, 2008, pp. 1753-1759.

Research methods

Considering stiffness estimation, state-of-the-art algorithms will be compared with respect to the following criteria: a necessity for position and velocity information from motor or link side, stiffness/flexibility torque convergence, and a possibility to estimate the stiffness of robot's end-effector. The research will proceed with the development of an improved estimation process, whose results will be verified in both simulations and on the experimental setup. The accuracy of the estimation can be checked by comparing obtained results with the stiffness model provided by the producer's datasheet or with the stiffness calculated from the data of a force/torque sensor mounted on the output shaft of the robot's joint. Criteria such as Mean Square Error and Mean Square Relative Error Percentage will be used to numerically depict the difference between the estimated and real value of the stiffness.

The research will proceed with the detailed analysis of state-of-the-art solutions for the control of soft robot's position and stiffness, specifically adaptive control laws. Then, a new adaptive control law will be designed so that both position and stiffness of each soft robot joint are controlled simultaneously and in a decoupled way, assuring the asymptotic tracking of the desired

position and stiffness values. Such control law will first be tested in a simulated environment of Simulink on a multiple-degree-of-freedom soft robot, and afterward examined on the experimental setup. The performance of the algorithm will be evaluated according to the error and speed obtained during tracking various position and stiffness references.

Expected scientific contributions

Expected scientific contributions of the thesis are the following:

- Systematic overview of the literature and methods in the field of soft robot stiffness estimation.
- So far, a model of stiffness in soft robot joint driven by VSA is obtained by performing extensive model identification procedures. Reliable on-line estimation of stiffness in the robot's joints would reduce the time and simplify the process necessary to obtain the initial stiffness model for variable stiffness actuators. Besides, by using on-line stiffness estimators, even when the change in the elastic transmission occurs due to the room temperature or wear of springs, the user can get a valid estimation for the stiffness of the robot's joint.
- Advancements in estimating a robot's stiffness have the potential for a high impact on the procedures for a human limb's stiffness estimation. First, it would lead to an improvement in understanding and coping with Parkinson's disease. Secondly, by using knowledge on human stiffness, the teleoperation of robots would be achieved more easily with better results, since, so far, the extensive offline and the highly personal-dependent procedure is used to calculate arm's stiffness. On this behalf, recent results have shown that when the stiffness of a robot arm is teleoperated, the robot manages to perform successfully peg-in-a-hole tasks.
- In the light of recent recognition that soft robots can become in the future close collaborators of humans within industrial and home environments for the purpose of improving factory production or servicing the elderly, it is of utmost importance that such robots remain safe and adaptable to the environment. This thesis will consider developing appropriate adaptive control law in order to increase the safety of the overall robotics system.
- First experimental validation of the simultaneous and decoupled control of soft robot's position and stiffness, which will provide practical insight into its advantages and disadvantages.

Research plan

The research will be conducted following the main idea of controlling soft robots in a way that both safety and good performance can be ensured. As the first line of research, estimation of stiffness is performed, since that variable can not be measured. The second streamline of the research is oriented towards developing appropriate adaptive control which allows the simultaneous and decoupled position and stiffness tracking of a robot with uncertain dynamic parameters.

1) The first phase – estimation of stiffness in soft robot's joints

To enable closing the loop on stiffness, one needs to estimate its value in flexible robot joints or end-effector.

The prime step in the literature overview is the comparison of previously developed algorithms (parametric and non-parametric approaches, attacking the problem from the motor or link side, estimating stiffness directly, or indirectly via flexibility torque).

Once the advantages and disadvantages of current solutions are determined, it will be proceeded with improving them, by developing an algorithm that requires less information from the sensors and fewer parameters to be tuned.

Finally, the performance of the proposed estimator will be examined via simulations and experiments for different use-cases, by comparing its outcome to the real values of stiffness in the joint.

2) Second phase – decoupled and simultaneous adaptive control of position and stiffness

Initial step in the research is analysis of literature covering topics on soft robots (actuation systems: Variable Stiffness Actuators, Serial Elastic Actuators; actuation sources: pneumatic, hydraulic and electric drives; types of soft robots: soft robots with elasticity concentrated in joints and soft robots with elasticity distributed along the link) and control laws (model-based: dynamic and static feedback linearization, back-stepping; and model-free: nonlinear adaptive control, model predictive control, feed-forward control).

As a second step, the design of appropriate adaptive control law is performed, such that no higher derivatives of position and stiffness are needed, the control of these two variables is decoupled and robustness to uncertain dynamic parameters is achieved. Formal proof of stability will be derived to ensure the asymptotic tracking of position and stiffness.

Finally, the third step contains the verification of derived control law in both simulations and experiments. Single and multiple-degree-of-freedom robotic setup will be used to show the performance of the algorithm, and compare it to different control strategies.

Conclusion and proposal

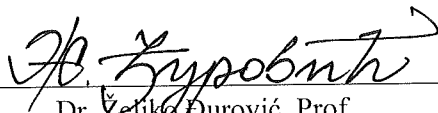
Based on the above, the Commission concludes that the candidate Maja Trumić, master engineer of electrical engineering and computer science, meets all the necessary conditions for the preparation of a doctoral dissertation entitled "Stiffness Estimation and Adaptive Control of Soft Robots". In addition to meeting the formal requirements, the candidate demonstrated the ability to systematically approach problem analysis and theoretical and practical knowledge in the field of modeling and control of robotic systems and stiffness estimation for robots with flexible actuators, as well as presenting results to the scientific community. The proposed topic is very current and based on both the research activities of the scientific community and the commercial needs of the market. The scientific contributions of the candidates are important for the development of a new generation of collaborative robots whose advantages are based on the technology of variable stiffness actuators and the expansion of the possibilities of their application.

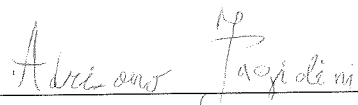
The Commission proposes to the Teaching-Scientific Council of the School of Electrical Engineering of the University of Belgrade to approve the preparation of a doctoral dissertation entitled "Stiffness Estimation and Adaptive Control of Soft Robots " under the mentorship of Dr. Kosta Jovanović, assistant professor at the School of Electrical Engineering, University of Belgrade, and Dr. Adriano Fagiolini, Assistant Professor at the Department of Engineering, University of Palermo, Italy.

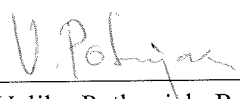
Belgrade, 27.08.2020.

MEMBERS OF THE COMMISSION


Dr. Kosta Jovanović, Asst. Prof.,
University of Belgrade – School of Electrical
Engineering


Dr. Željko Đurović, Prof.,
University of Belgrade – School of Electrical
Engineering


Dr. Adriano Fagiolini, Asst. Prof.,
University of Palermo –
Department of Engineering


Dr. Veljko Potkonjak, Prof.,
Metropolitan University in Belgrade


Dr. Slobodan Vukosavić, Prof.,
University of Belgrade – School of Electrical
Engineering